欧姆社学习漫画

漫画 流体力学

〔日〕武居昌宏／著
〔日〕松下マイ／漫画绘制
〔日〕Office sawa／漫画制作
高丕娟／译



科学出版社
www.sciencep.com

KindleDX出版署

致广大读者

无论是机械工程专业、土木工程专业、建筑专业还是化学专业，等等，大学里众多的工科当中，物理学中的力学都是必修科目。其中流体力学（有时称之为流动的力学和水力学）因为公式繁多，且研究的又是不易观察的气体和液体的运动方式，总是给人一种高深莫测的感觉，因此很多人都敬而远之。

我在大学里教授流体力学课程已有八年之久，有的学生根本不理解这一学科的内容，而我每年都能遇到不少这样的学生，他们因为错过了理解流体力学的“契机”而彻底放弃学习这门课程。不仅如此，这种厌学、弃学的氛围每年都在不断扩散。面对这种让人痛心的局面，我便自忖，如果有本教材或读物能够为大家提供理解流体力学的“契机”，岂不是可以避免这种负面影响的蔓延？

出于以上考虑，我编写了这本书，为的是让那些错过了理解流体力学“契机”的人和初次听到这一名词的人，能够全面理解流体力学的本质。曾经有很多人反对通过漫画这种方式来学习，然而，漫画现在已经成为一种轻松掌握各学科知识的流行趋势，其作为宣传媒介的地位已经逐步确立。通过漫画，提供理解流体力学的“契机”，从而能够帮助学生学习，这就实现了本书的写作目的。如果广大读者能够轻松地阅读本书，并收到学习流体力学的效果的话，我将倍感欣慰和荣幸。

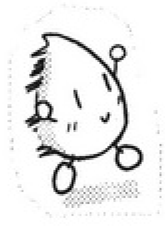
最后，日本大学理工学部机械工程专业武居研究室的赵桐老师、负责本书制作的 Office sawa、为本书绘制漫画的漫画家松下マイ老师，以及负责本书出版的编辑等，都给予了本人很大帮助，在此表示衷心的感谢！

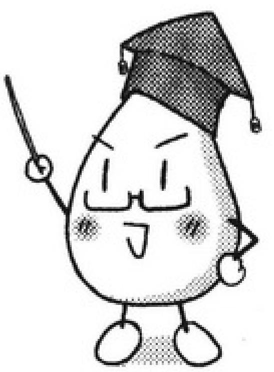
2009 年 10 月

武居昌宏

目录







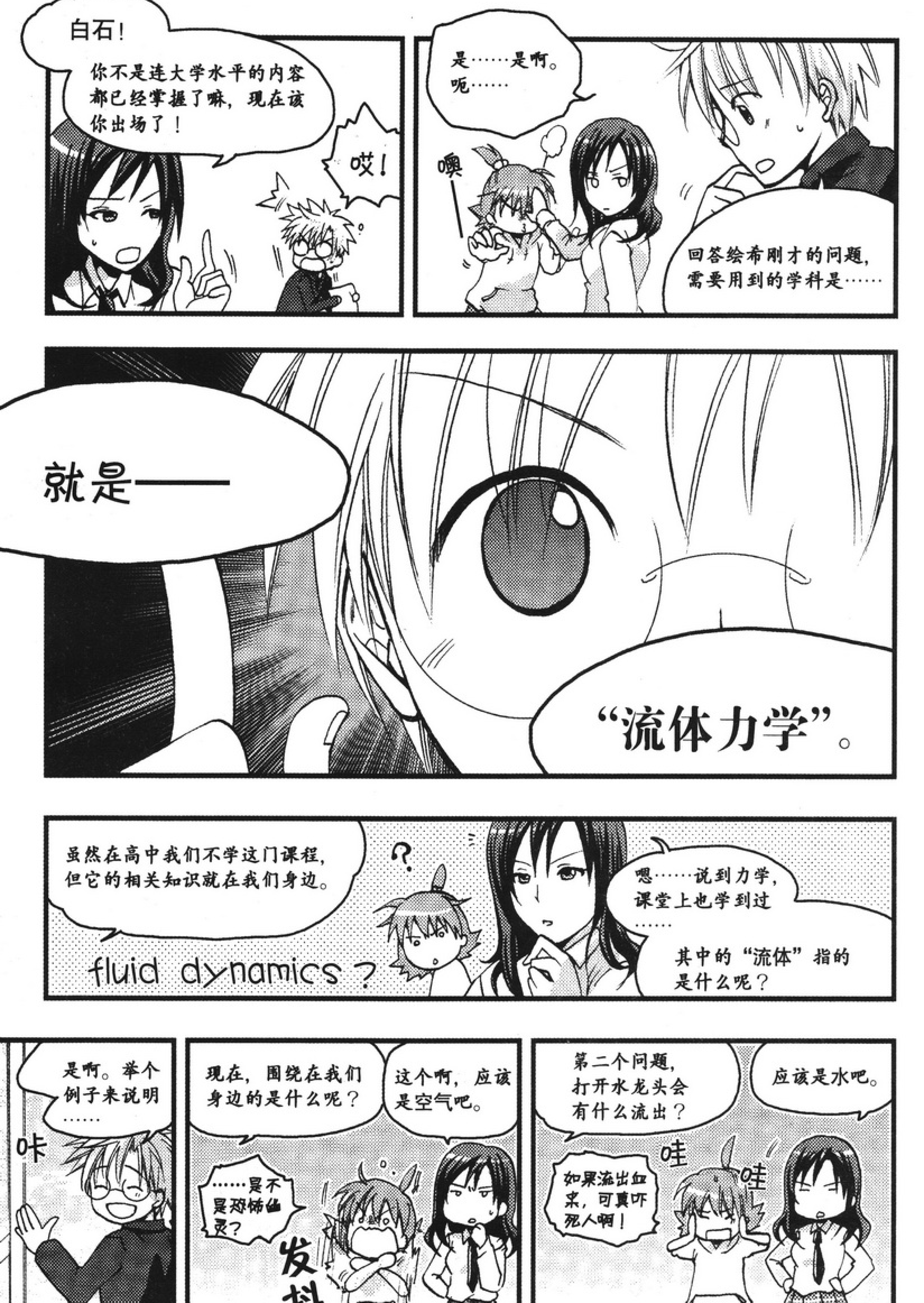
序言

预知未来的梦！
神秘少女和流体力学




神秘现象研究部
哒
哒
哒
哒
大家注意啦！
不得了啦！
我今天又做了一个预知未来的梦！
预知未来的梦呐！！！
啊！
早上好，绘布。
还是老样子，闹哄哄的……
喂！你们两个也太沉得住气了！
噢，对不起啊，
这次梦到什么了呀？
哼
哼
嗯！
对了……
谢谢您了，阿茜学姐！
砰


当
嘭！
当
可恐怖了！
大船沉没了！
飞机失事坠落了！
是不是应该通知电视台啊？
这么下去可要发生大悲剧呀！！
发生大悲剧的是
你的脑袋吧……
哇噢
哇啊啊
哇啊啊
这种事不会发生的啦。
这么大呼小叫的，不太好吧。
嗯……
做了这种梦，内心不安
也是没办法的事情嘛！
不过，话说回来，
为什么飞机会飞呢？为什么船只
不会沉没呢？
我现在满脑子都是这些问题……
沉重的铁块能够浮在水面，
这是一种超自然现象。
为什么能浮上来呢？
咦
你是小学生吗？
那……阿茜学姐给
我解释一下吧！
让我给解释
一下啊……
什什么么
呵呵


白石！
你不是连大学水平的内容都已经掌握了嘛，现在该你出场了！
哎！
是……是啊。呃……
噢
回答绘希刚才的问题，需要用到的学科是……
就是——
“流体力学”。
虽然在高中我们不学这门课程，但它的相关知识就在我们身边。
fluid dynamics？
嗯……说到力学，课堂上也学到过……
其中的“流体”指的是什么呢？
是啊。举个例子来说明……
咔
现在，围绕在我们身边的是什么呢？
这个啊，应该是空气吧。
……是不是恐怖幽灵？
发抖
第二个问题，打开水龙头会有什么流出？
应该是水吧。
哇
如果流出血来，可真吓死人啊！
哇


拧开
是的。
空气是气体，水是液体，对吧。
哗啦啦
气体与液体
合称为“流体”！
原来如此……的确就在我们身边啊。
流体·
所谓流体，也没有什么特别难理解的嘛！
是的。
空气流动会生成风，
水也能够自由自在的流动。
是啊，是啊。
也就是说……



流体就是能够自由改变形状的物体。
不过，这流体是怎样改变形状的？又是怎样运动的呢？
这些问题你们明白吗？
这就是流体力学的研究内容了。
身边的流体我弄明白了……
可是白石，弄明白了流体的内容能有什么好处吗？
好处有很多啊！
现代社会舒适、便捷的生活就有很多方面受益于流体力学。
制作电器的过程中，流体力学就起到了很大的作用；
为家庭和工厂输送水和燃气的泵体结构也离不开流体力学。
噢


呼
呼
另外，体育运动和电器产品也跟流体力学密切相关。
各种体育运动中球类的运动
送风的空调设备
用水的洗衣机、还有船只、飞机、汽车等各种交通工具。
像弯道、弧线球、滑板、波动……
这类词语女性可能比较生疏。
通过大气模拟装置来研究全球变暖问题，预测地球的未来，
人工心脏内的血液循环，这都是活用流体力学的典型例子。
……心脏！
总之，无论是在我们身边，还是在更大的范围内，
流体力学都有着广泛的应用。
真是很有趣的话题啊……
那么，我们再回到绘希最初的问题上……
为什么飞机会飞？为什么船只不会沉没？
流体力学还能够回答这些基本问题！
咔咔


哇噢！
这么说还真了不起呢！真是了不起！
莫非流体力学能够解开很多神秘现象的谜团？
太棒了！我想知道！白石，快点教教我！
快快
快快
啊……
好、好的，我会尽力的……
只是……如果说到流体力学，话可就长了。
可能要占用所有的团体活动时间，这样也没问题吗？阿茜部长……
嗯……
没问题啊。我也被你说的正在兴头上呢。
拜托你了，白石！
好的。
太好了！
流体力学能够解开超自然现象的谜团……
神秘现象研究部
解开谜团！
不是的……绘希，
我们本来就是神秘现象研究部嘛，这可不是装门面糊弄人的……
啊！
阿茜学姐……
嘛

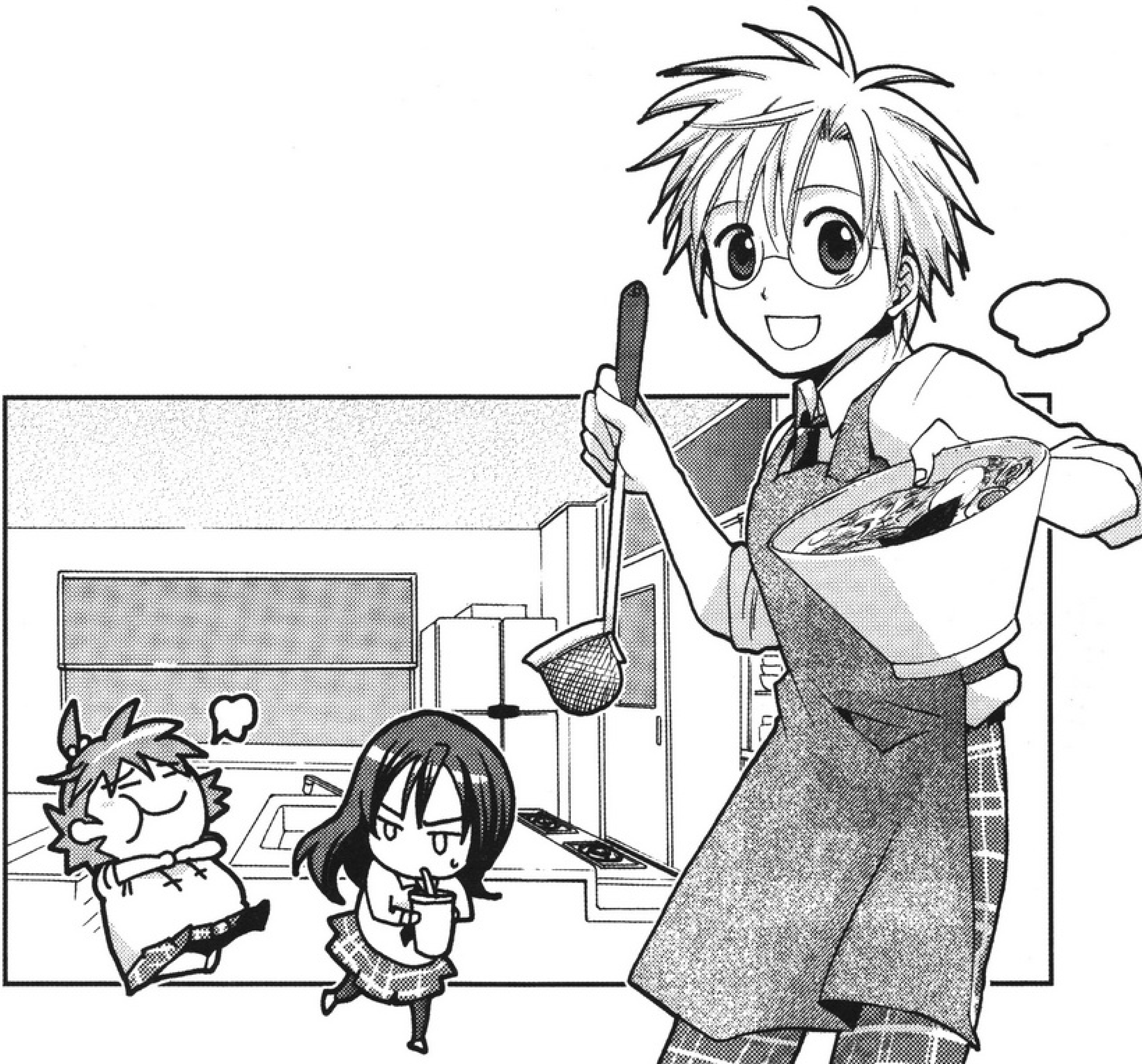


哇
物理研究部
哇
我们是堂堂正正的
物理研究部！
哇哎哎哎哎！
好不容易贴上去的！
我早就想撕下来了！
我们又不是研究神秘问题的社团！
哇噢……
可，可是……
物理这个词儿，给多数人的印象是研究“肉眼看不见的物体”的学问！
哇
哇
所以，还是神秘这个词儿比较好，不但形象、有趣，而且还有神秘感和怪异感！
好了好了！
我再写一次！
跟你在一个社团还真是让人头疼……
笨蛋……
3
神秘现象
我可不是什么笨蛋！我只是非常喜欢神秘不可思议的东西而已。
看
那是你的兴趣爱好吧！
我们还是把那些来路不明的离奇古怪的东西扔出社团活动室的好！


喂
好啦，好啦，
或许在紧急关头能够起到什么积极作用也说不上嘛！
我期望能有那么一天……
呃……
那么，我们就重整心情。
彼此友好和睦，一起来学习流体力学吧！
嗯！
目标确立！神秘……不对，是流体力学，我们一起来学习！

第1章

流体的性质与静力学



1. 固体与流体

请用冰茶


烹饪室
哇噢！
我们要在这里学习流体力学吗？
与其说学习，不如说适应更准确，这是白石的理论。
我运气不错呢，获得了这里的使用权。
嗨！感觉不错啊。
看到社团活动室黑板上的留言，我还困惑呢：这是要干什么啊？
烹饪室见！
!?
啊哈哈
时间比较紧张，没详细说明，很抱歉。
那我们赶紧开始吧。


首先，请用这杯冰茶！
咔啦
哇噢！
非常感谢！
言归正传，
前两天我们已经讲过，气体和液体统称为流体。
我是跑步来的，嗓子正干得难受呢！
呼——。
请大家看看这杯冰茶，
冰块是固体，而茶水是液体。
嗯，嗯！
肉眼能够看到的东西全部可以分为固体或者流体。
但是，这个固体和流体会随着温度的变化而改变形态。
?
啊……
冰块升温就会变成水，水加热会变成水蒸气。
冰块（固体）
水（液体）
水蒸气（气体）
0℃
100℃
啊！
不愧是部长，确实如你所说。


关于“固体、液体、气体”的特征，我们从分子层面上进行观察分析。
固体
老实
牢固
冰块作为固体，其分子组合非常稳定，轻度力量不能拆散这种组合。
噢！非常出色的团队合作！
排列整齐有序呢……
液体
松缓
轻柔
液体的分子也还算是老实本分，但也不是静止不动。
分子之间相互吸引又相互排斥，看起来比较忙碌。
气体
耶
嗨
气体的分子却是非常的自私任性，只顾自己方便，任性的来回飘动。
一点都不稳重这点倒是跟某个人很相似呢……
?



液体和气体——“流体”是能够变形的。
呦噢
呀
呀
物如其名，是可以“流动的”。
是这么回事啊！
呀
呀
呀
嗯
是的。流体的性质、运动……以及流体中物体的运动。
研究这些问题的学问就是流体力学。
噢……
大概理解了……
唉啊
虽然感觉好像弄明白了……
可是，白石，我怎么总觉得什么地方很神秘呢！
快点教我们流体力学的内容吧！我已经迫不及待的想解开神秘现象的谜团了！
别、别那么心急！
嗨～
事实上，流体力学是以物理力学为基础的。


所以，为了学好流体力学，
我们要先掌握基础的力学知识！
怎么会这样！我对力学可是一窍不通！！
这可怎么办啊！
你真的是物理研究部的成员吗……
不、不要紧的绘希，
今天我们先学习公式和单位等力学的初步知识。
哇啊啊
真的？
太感谢你了，白石！
咕噜噜……
啊……
不紧张了就觉得肚子饿了。
我还是先系上围裙吧。
我们开始做饭吧。
今天吃拉面。
而且是叉烧肉汤面，
口味可是很地道的喔！
当
当
哎！现在就开始？

2. 力与压强

用压力锅煮饭





里面是2个大气压……也就是说是另一个世界……
另一个世界？
充分发挥一下你的想象力，这可是个很有意思的场面喔。
容器当中流体（气体和液体）的分子不断地撞击容器内壁，你拥我挤，不亦乐乎，从而产生了压力。
呵呵
就像大爆炸一样，还真壮观呢。
叉烧肉一定也感觉很不错……
日常生活中我们也经常用到“压力”这个词，
力学中压力的作用效果称为“压强”，指垂直作用于物体单位面积上的力。
单位面积
从上方垂直向下……
很辛苦呢……
喂，绘希！
你又乱扔乱放！
对不起！
我在家里也承受着很大的压力啊……
呜呜
?



p = F/A
例如，我们用 A〔m²（平方米）〕表示面积，用 F〔N（牛顿）〕表示力，那么压强 p（小写 p）的计算公式则如上所示。
压强 p 的单位是 Pa（帕）。
……
？
1N（质量约 102g 的物体产生的重力）的力垂直作用于 1m²（边长为 1m 的正方形的面积）的面积上所产生的压强就是 1Pa。
用公式和语言表示如下！
哦，哦！
p（压强）= F（压力）/ A（面积）
从公式来看，压强的单位 Pa（帕）也可以写作 N/m²（牛顿每平方米），能看明白吗？
压强（Pa）= 力（N）/ 面积（m²）
真的啊。
1Pa=1N/m²！
压强 p 乘以面积 A 就得到了压力 P（大写 P），
单位是（N）。
噢——
香味儿飘出来啦！绘希，能把压力锅搬下来吗？
好的！



嗨……这压力锅还挺沉呢。
这也是压强的缘故？
啊
很遗憾，这两者毫不相干。
你感到沉重，是锅自身的“力”作用于你的两臂引起的。
借此机会，我们正好强调一下“力”与“压强”的区别。
物理力学中有一个非常非常重要的方程式叫做“运动方程式”。
$F = m \times a$
（力）（质量）（加速度）
哇哦！
这是什么？
什么时候使用啊？
这个运动方程式就是力的定义式！单位是 N（牛顿）。
1N 的力是指质量为 1kg 的物体在 $1m/s^2$ 的加速度状态下所产生的力。
咝咝
加速度的单位是“m/s^2”，读做“米每平方秒”。
……关于这个问题，我将在后面进行详细说明（参考本书第 36 页）。
？
呃……先说明一下绘希现在的状态
锅现在受到向下的重力的作用，所以加速度 a 也就是重力加速度 g。



那么我们套用刚才的公式进行计算，
质量为 m 的锅所受到的力 F，应该等于重力加速度 g 乘以质量 m……
m= 锅的质量
g= 重力加速度
F= 锅的质量 × 重力加速度
m
F
啊！
是 F=mg。
这就是作用于我两只胳膊的锅的力啦。
加速度 a 和重力加速度 g 还频繁出现在其他的公式当中。
作为物理研究部的一员，可一定要记住哦。
嗯嗯，
知道了。
顺便说明一下，表示大小和方向的量叫做矢量，用箭头标志来表示。
与此相对，仅仅表示大小的量叫做标量。
标量
大小
矢量
方向
大小
F 和 g 都是矢量
在这里需要注意的是，矢量和标量的表示方法。矢量如 F、a、g 等都用粗字体表示，
标量如 t、m 等都用一般的细字体来表示，这需要大家特别留意。
好的！
明白了！
咕嘟
现在大家已经明白了力和压强的不同之处，
接下来再解释一下表记压强时所使用的绝对压强和表压。


绝对压强是以真空为起点，
表压是以大气压为起点
计算的压强。
表压
绝对压强
大气压
真空
绝对压强就是大气压
加上表压。
由于气象条件的不同，大气压
不断变化，
所以使用表压比较方便。
例如，汽车轮胎的气体压强就
是表压。
那么，我们再说说
压强的单位！
所谓标准大气压，也就是 1 个
大气压 =1atm。
如果用绝对压强来表示，就是
101.3kPa（千帕）。
都是餐具。
这两个工具
?
1atm……
101.3kPa……
另外还有一个单位叫
mmHg（毫米汞柱）。
它们之间的换算关系可以表示如下：
1 个大气压 =1atm=101.3Pa=760mmHg。
好难
唉！
单位比较多，
有些繁琐……
绘希，我们一点一点
地积累吧。不用心急。
叉烧汤面已经做好了，来，
拿出点精神劲儿来！
啊！太好了！
真单纯……

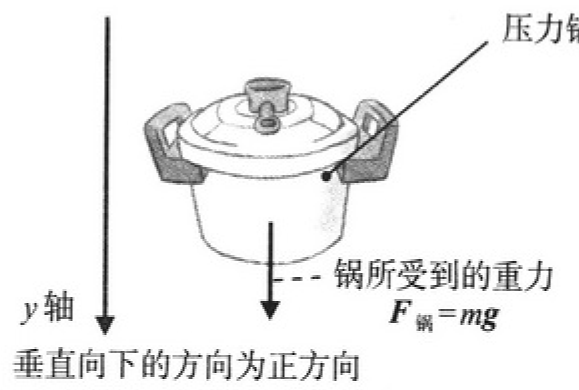
补充说明



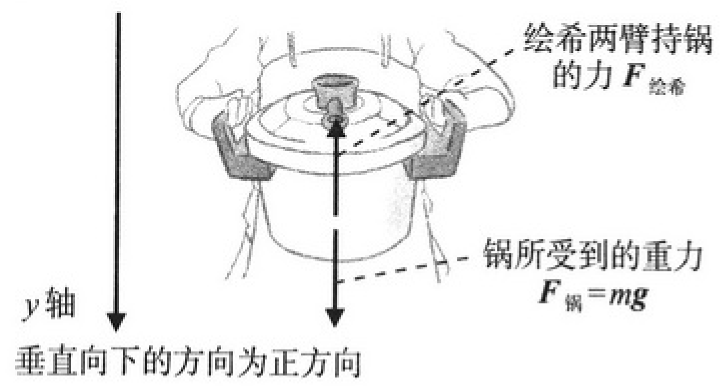
~一起来掌握力的平衡方程式吧~

严格说来，运动方程式 $F=mg$ 只有在物体处于运动状态时才成立。

绘希两手端着锅处于静止状态，这时应该称为“**平衡方程式**”，与“**运动方程式**”是不一样的。接下来我就详细解释一下两者的不同。



图A–1　锅下落时的力



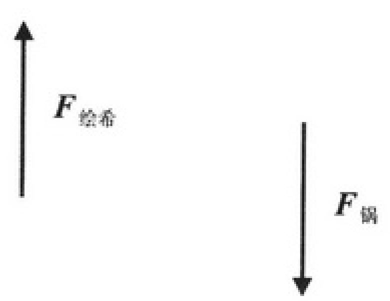
图A–2　锅静止时的力

如图 A-1，万一锅从绘希手中脱落的话会怎么样呢？由于锅受到重力 $F_{锅}$的作用，经过坠落的一段时间后，最终将与地板相撞。此时的重力 $F_{锅}$就等于 mg，表示这口锅运动状态的方程式就是“**运动方程式**”。此时将垂直向下的方向确定为 y 轴正方向的话，重力就是作用于 y 轴正方向的力。

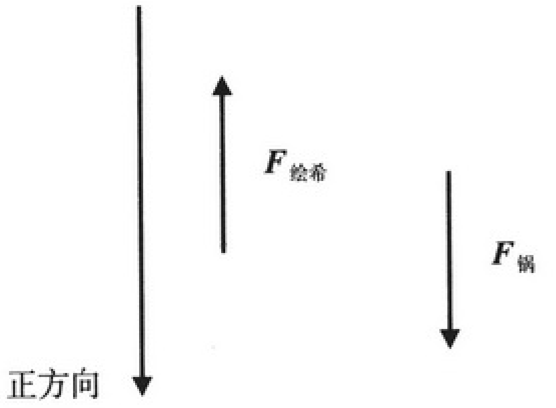
如图 A-2 所示，我们研究一下绘希双臂持锅抵消掉锅的重力 $F_{锅}$，使其处于静止状态的情况。表示这种静止状态的方程式就是“**平衡方程式**”。

● 平衡方程式的原理

① 如图 A-2 所示，我们将所有的力用箭头在下图中表示出来。



② 首先，我们确定力的正方向。在这里我们以垂直向下的方向为正方向。其实相反也没有关系。



③ 考虑到正方向和负方向，我们把力全部写在左侧。

$-F_{绘希}+F_{锅}$

④ 处于平衡状态，右边为 0。也就是说，所有的力达到一种平衡，所以$\sum F=0$。这里的$\sum$（Sigma）是一个求和的数学符号，意思是将它后面的所有 F 相加的意思。

$-F_{绘希}+F_{锅}=0$

顺便说明一下，在表示运动物体的“运动方程式”中，上述第④点中公式的右侧应该是质量 $m\times$ 加速度 g 或者 a。也就是

$\sum F=mg$

那么，我们再来看看图 A-2 中所表示的在静止状态下锅所受到力的情况。这里需要注意的是，关于绘希两手对锅的支撑力 $F_{绘希}$，通过第③点中的公式 $-F_{绘希}+F_{锅}=0$，最终我们得到以下结论：

$-F_{绘希}+F_{锅}=0$，所以
$F_{绘希}=F_{锅}$

而且，根据运动方程式，锅所受到的重力 $F_{锅}=mg$，所以得出

$F_{绘希}=mg$

总之，$F_{绘希}$虽然不是直接的，但归根结底却是间接地变成了 mg，这一点需要特别注意。

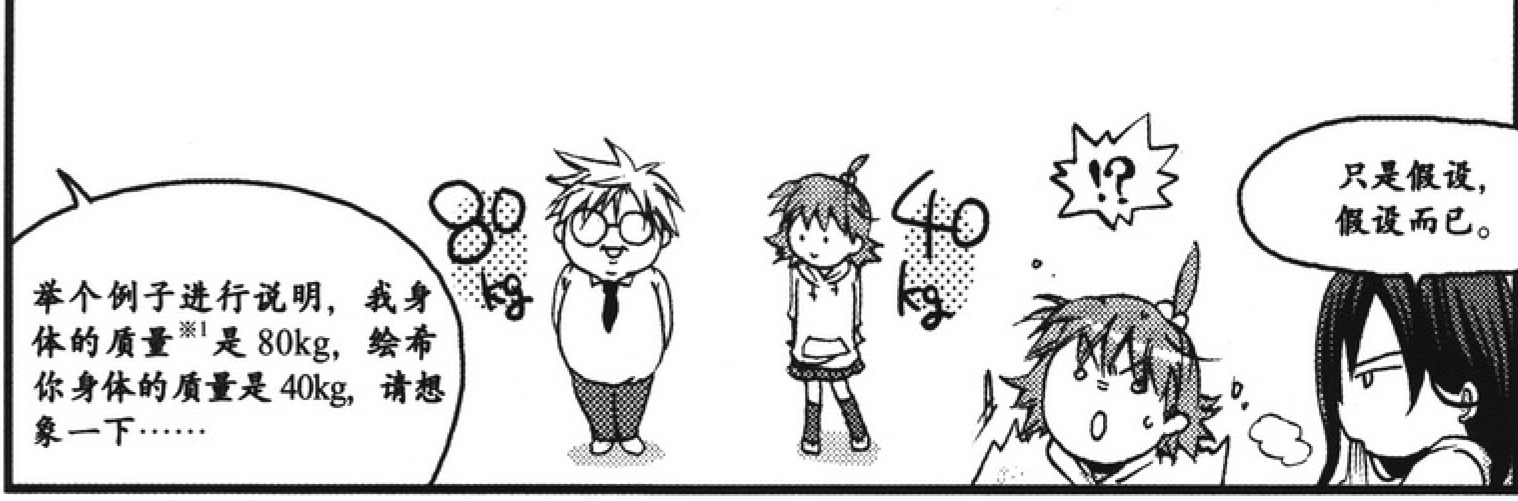
3. 密度与比重

叉烧肉汤面味道浓郁的秘密





噢——
回答正确！
密度一般用希腊文字 ρ (rōu)来表示。
用 m（kg）表示物体的质量，V（m³）表示物体的体积，那么物体的密度公式如下：
$\rho = \frac{m}{V}$
为了简单易懂，我们将公式添加上文字来表示。
密度（kg/ m³）= 质量（kg）/ 体积（m³）
单位是（kg/ m³），读作（千克每立方米）。
请想象一下，长、宽、高都是 1m 的水槽，
它的体积就是 1m³。
1m
1m
1m
将水槽灌满水，水的质量就是 1000kg，
即 1t（吨）。
咚
！哇！！
也就是说……水的密度是 1000kg/m³，
采用同样的计算方法可算出食用油的密度是 890kg/m³……
水
1000 kg/m³
油
890 kg/m³
哦哦哦，
油的密度小，所以油才漂浮在水面上！
那么，如果体积相同，则只需要比较质量的大小即可，
这就需要用到“比重”这个概念。这是因为，以一种物质为标准比较密度大小容易理解。
比重



※1　物理学中没有体重这一说法，而是称之为身体的质量。



$$s\text{（比重）}=\frac{\rho\text{（流体的密度 kg/m}^3\text{）}}{\rho_w\text{（水的密度 1000kg/m}^3\text{）}}$$

※2　这是指在标准大气压 1atm=101.3kPa、温度为20℃的条件下。

4. 帕斯卡原理

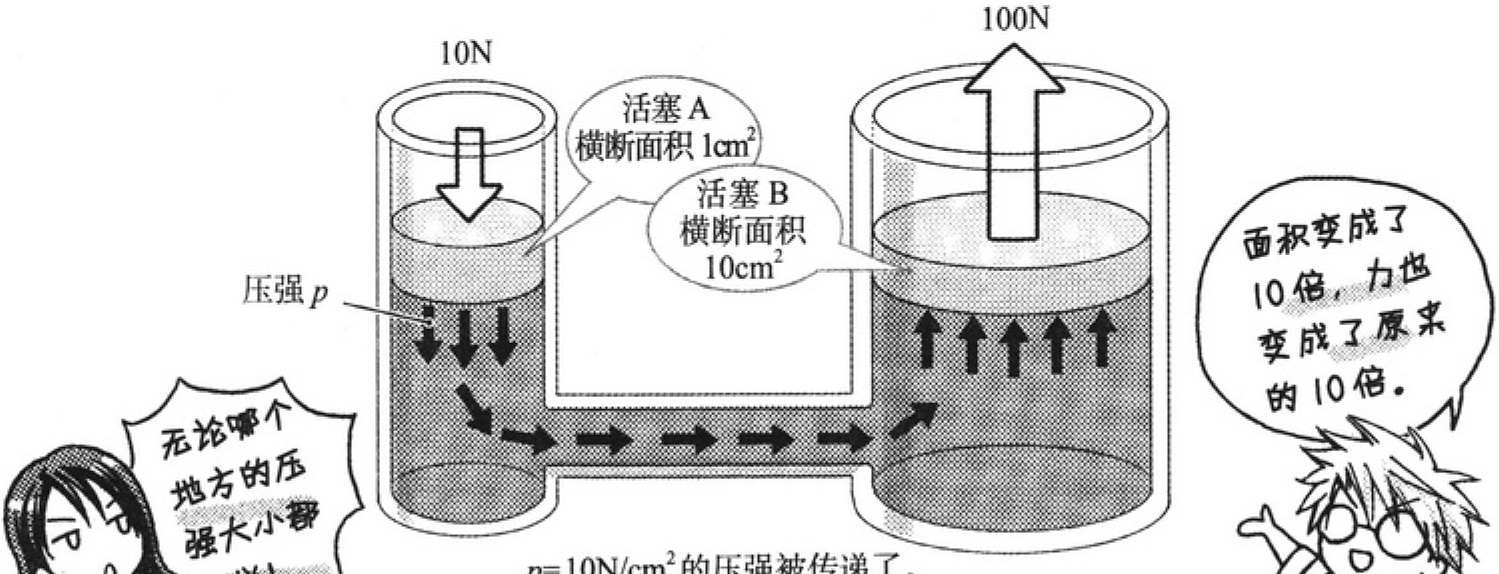
我是超人



嗯……
真是太好吃了。
吃饱了能睡一觉的话
该有多幸福啊……
啊……吃饱啦……
在干什么呢，绘希？
赶紧把碗筷收拾了。
啊……
锅也变重了，拿不
动了……
当
这可不行……
绘希，
要不我给你施个
魔法吧。
别说是锅了，就是汽车，
你也能拿的动。
而且就用
一只手！
啧？
白……白石，
你到底是什么
人啊！
白石，我可明白你的
意思了……你是想说
油压千斤顶吧。
接下来该讲帕斯卡原理
了吧。
喀喀
呵呵
露馅儿了吧？



油、油压……
千斤顶……
施加于静止流体上一点的压强将以等值同时传递到各点，这就是原理的内容，
很简单吧？
换一种说法，就是向盛放在密封容器中水的一部分施加压强时，同样大小的压强将传递向各个方向……
非常抱歉，跳得有点儿多了。
哇—噢
来，让我们发挥一下想象力！
情景是“满员的电车上相扑用力向前推乘客”。
被推的乘客 1 同样也会向前推站在自己前方的乘客 2，被乘客 1 推的乘客 2 同样也会向前推站在自己前方的乘客 3……
哇噢啊!!
以此类推，电车中的所有乘客都会承受“压强”。
这就是“帕斯卡原理”。只是有一点需要特别注意，
虽然压强的大小一样，
但压力 = 压强×面积的大小并不相同。
没有可以逃脱的地方！
的确会向所有方向传递……
呀—!
在解释说明帕斯卡原理的时候，经常会用到这个情景举例。



p=10N/cm² 的压强被传递了。

如上图所示，将管内注入水，则有两个水平面。

右侧容器 B 的水平面面积是左侧容器 A 的水平面面积的 10 倍。

如果给活塞 A 施加 10N 的力，那么水平面上会产生压强 p。

根据帕斯卡原理，压强 p 能够传递到液体的每个位置，所以右侧的水平面也会产生同样大小的压强。

而且，因为右侧容器 B 的水平面面积是 A 的 10 倍，

所以活塞 B 所受到的压力（压强 × 面积）也应该是活塞 A 所受到的压力的 10 倍，变成了 100N。



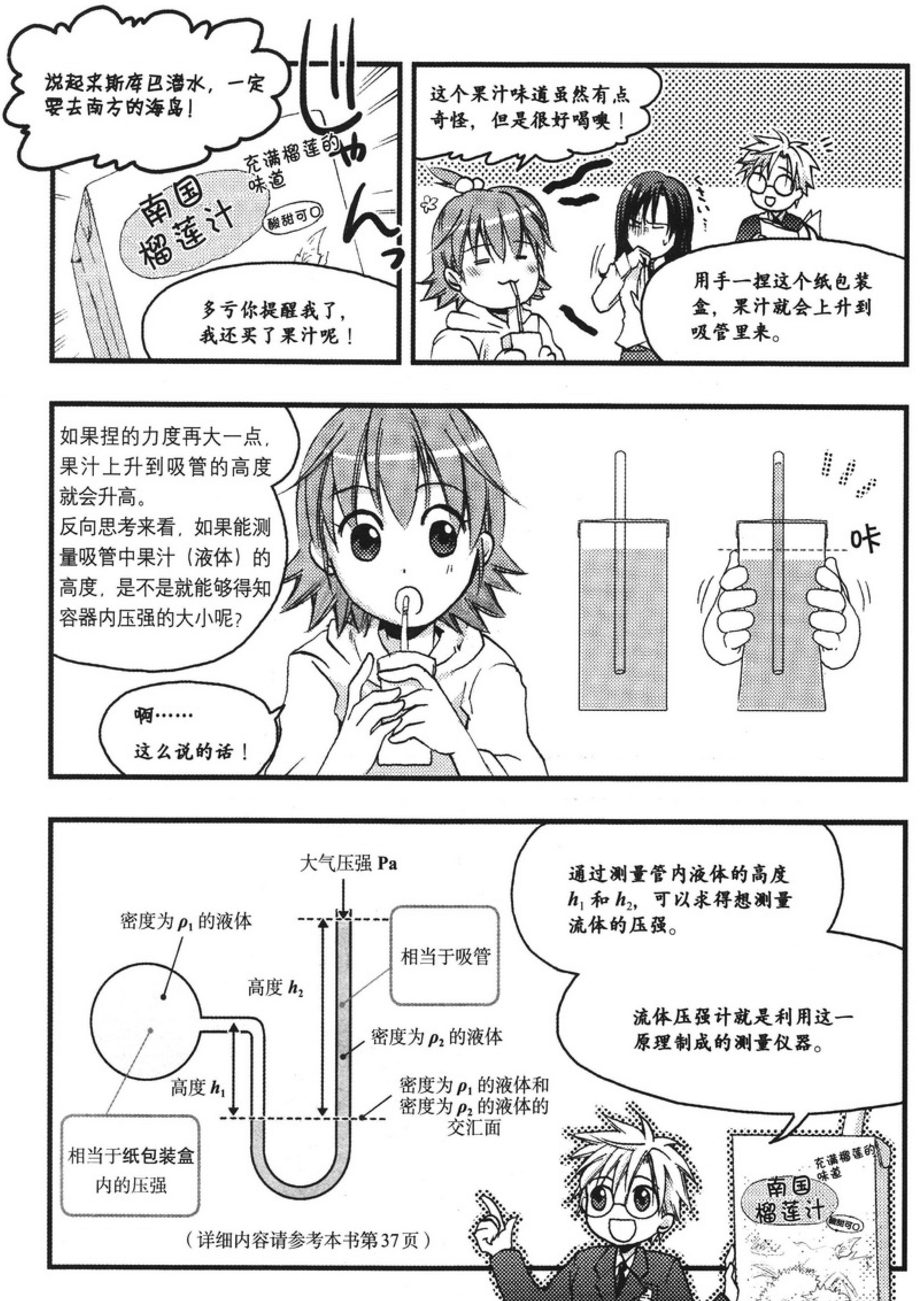
5. 压强与高度的关系、测量压强

带我去斯库巴潜水




我首先提议，不如一起去斯库巴潜水，你们说怎么样？
噗
噜
！！
说起来去斯库巴潜水，下水之前可有一件很重要的东西要准备。
那就是“潜水耳塞”。
鼻孔被封住了，不能进行正常的呼吸……
绘希！！
噗
噜
耳朵！
好景！
哇啊啊
在这种情况下，如果没有认真戴好潜水耳塞，耳朵会产生一阵严重的刺痛感。
喀
喀
我们来一起考虑一下为什么会出现这种情况。
首先，潜入海水中后，随着入水深度不断增加，水的压强也不断增强。
嗯……
是这么回事儿。


在水深的地方，耳朵鼓膜外侧水的压强增加。
+
−
鼓膜
鼓膜内侧的压强还是和在地面上一样。因此，鼓膜就会被压入耳内。
如果一下子升高到很高的地方，则会出现相反的情况……但结果是一样的，
也会出现耳朵疼痛的现象。
哇……
这么恐怖啊！
无论是下降到地下很低的地方，还是上升到地面很高的地方，以地面压强为标准，
此时的压强与标准压强的“压强差”用Δp（Delta p）来表示。
所谓Δ，不仅具有“差”的意思，有时还可以表示“微小”的意思
（详细内容请参考本书第35页）。
流体的密度用ρ来表示，与地面（或者水面）的距离（深度或者高度）用h（m）来表示，
那么地面与距离地面h（m）处的压力差Δp的计算公式如下：
以水面的大气压为标准
Δp＝ρgh
h〔m〕
单位是Pa（帕），在第2节讲压强时也说过，
1Pa＝1N/m²
（请参考本书第19页）。
也就是说，
压力差（Δp）＝流体密度（ρ）×
重力加速度（g）×
距离（h）
明白了吗？
耳朵之所以会疼，是因为压强差的缘故啊……
啊！对了！


说起来斯库巴潜水，一定要去南方的海岛！
じゅんっ
充满榴莲的味道
南国榴莲汁
酸甜可口
多亏你提醒我了，我还买了果汁呢！
这个果汁味道虽然有点奇怪，但是很好喝噢！
用手一捏这个纸包装盒，果汁就会上升到吸管里来。
如果捏的力度再大一点，果汁上升到吸管的高度就会升高。
反向思考来看，如果能测量吸管中果汁（液体）的高度，是不是就能够得知容器内压强的大小呢？
咔
啊……
这么说的话！
大气压强 Pa
密度为 ρ_1 的液体
相当于吸管
高度 h_2
密度为 ρ_2 的液体
高度 h_1
密度为 ρ_1 的液体和密度为 ρ_2 的液体的交汇面
相当于纸包装盒内的压强
（详细内容请参考本书第37页）
通过测量管内液体的高度 h_1 和 h_2，可以求得想测量流体的压强。
流体压强计就是利用这一原理制成的测量仪器。
充满榴莲的味道
南国榴莲汁
酸甜可口

补充说明



~Δp中Δ的意思~

$\boldsymbol{\Delta p}$（Delta p）中的 Δ 有两个意思。

一个是“差”，一个是“微小”。



第 33 页中 Δ 的意思，就是指与作为标准的地面压强的“差”。

另一方面，当作为“微小”这个意思来使用的时候，与接下来要解释说明的“速度与加速度”、第 3 章中第 107 页的“速度梯度”、第 120 页和第 127 页中压强梯度微分方程式中 $\boldsymbol{d}$ 意义相同。

此处为什么是“微小”而不是“多”呢？举个例子，现在我们虽然知道自己所处地方的大气压强，但却无从知道 100km 以外的大气压强。那里可能正在刮台风，压强变化很大。因此，我们只能预测“微小”距离，例如 1mm 左右之外的大气压强只有“微小”的变化。



~ 速度与加速度 ~

在第 20 页的运动方程式中曾提到过加速度这个概念，在此对**速度和加速度**这两个概念作个详细的说明。

所谓“**速度**”，是指单位时间内（可以认定为一秒钟内）物体所移动的距离。

如果物体在 Δt（s）（此处的 Δ 的意思是“微小”）时间内移动 Δx（m），那么其速度 u（m/s）的计算公式则是$u=\frac{\Delta x}{\Delta t}$。

一般情况下，为了区分 t、x 等表示量的符号，将其单位写在后面的（ ）中。s 是英语 second 的缩写，意思是“秒”，m 是米（meter）的意思。速度的单位是（m/s），读作“米每秒”。

此处的 Δ 和微分方程式中的符号 d 意思相同。

请将此处 Δ 的意思理解为“微小”或“微分”。

因此，速度 u 的计算公式$u=\frac{\Delta x}{\Delta t}$便可以改写成$u=\frac{dx}{dt}$。

另外，因为速度表示的是物体以怎样的速度（大小）在朝哪个方向移动，所以它是既表示大小又表示方向的**矢量**。为了能够区别矢量和标 量，一般用**粗字体**来表示矢量。

最后，表示**速度在单位时间内变化状况**的物理量，就是**加速度**。

因为加速度是速度 u 被时间 t 微分了的物理量，所以**加速度** a（m/s^2）的计算公式是$a=\frac{du}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2}$。

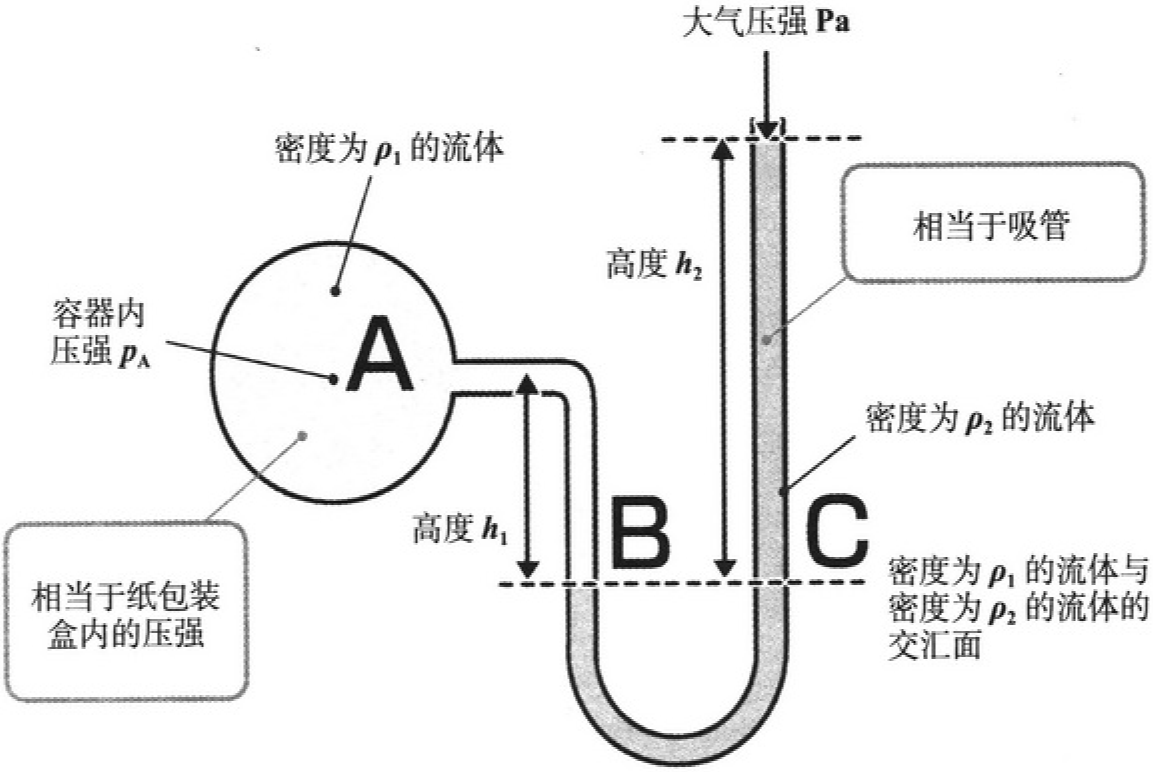
也就是说，加速度是位置 x 被时间 t 2 次微分的值。

加速度的单位是（m/s^2），读作“米每平方秒”。



~流体压强计~

刚刚提到过，测量容器内压强大小的装置叫做流体压强计，在这里我们解释说明其工作原理：**为什么通过管内液体的高度就能够得知容器内压强的大小。**



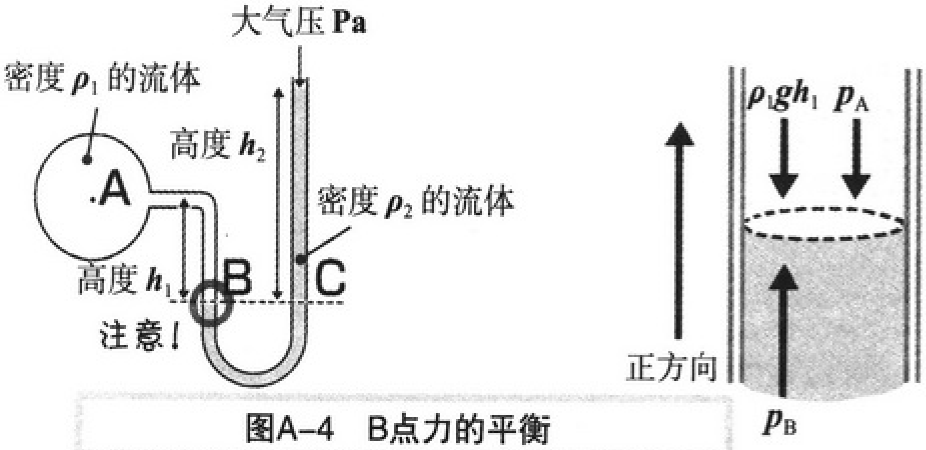
图A–3　流体压强计的原理

如图 A–3 所示，把待测压强的密度为 ρ_1 的流体注入容器内，将密度为 ρ_2 的流体注入 U 形管内，并把容器和 U 形管的一端连接到一起。U 形管的另一端与大气压 p_0 直接接触。在这种状态下，求容器内 A 点的压强 p_A。

因为 p_A 比 p_0 的压强大，所以容器内 ρ_1 的流体会流入 U 形管内的 B 点，U 形管右侧管内 ρ_2 的流体高度上升，各种力处于平衡状态，流体静止不动。

考虑一下上图中 B 点的压强，此处管内 A 点压强 p_A 与 $\rho_1 gh_1$（相当于密度为 ρ_1 的流体在高度 h_1 处的压强）的方向向下，而 B 点压强 p_B 方向向上，所以流体处于静止状态。

因为压强指的是单位面积所受到的力，所以我们套用在第 23 页中解释说明过的力的平衡方程式，来继续探讨流体压强计的原理。

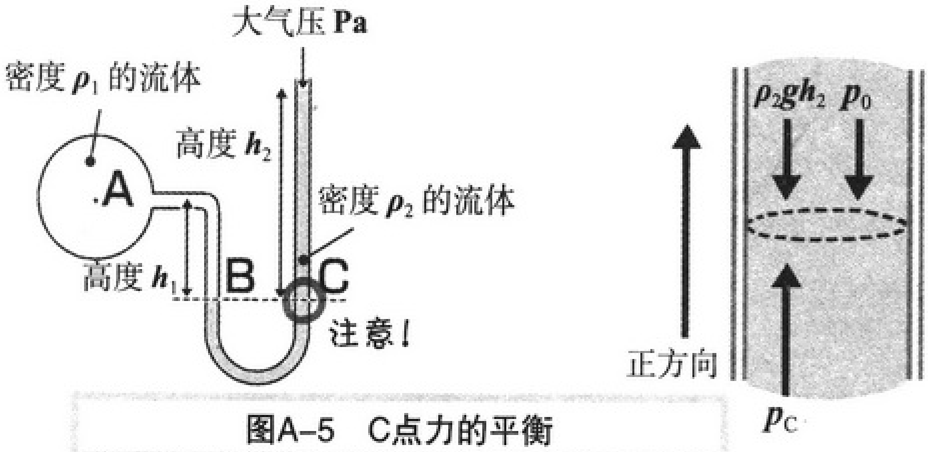


图A-4　B点力的平衡

如上图 A–4 所示，将向上的方向确定为正方向，那么 B 点的压强 p_B、$-\rho_1 g h_1$、$-p_A$ 处于平衡状态，其平衡方程式如下：

$$p_B-\rho_1 g h_1-p_A=0$$

$$\therefore p_B=\rho_1 g h_1+p_A \tag{1.1}$$



图A–5　C点力的平衡

如上图 A–5 所示，U 形管右侧管道中与 B 点高度相同的 C 点，其所受到的压强当中大气压 p_0、$\rho_2 g h_2$（相当于密度为 ρ_2 的流体在高度 h_2 处的压强）的方向向下。

C 点的压强 p_C 方向向上，所以流体处于静止状态。

因此，用力的平衡方程式来表示 C 点的压强如下：

$$p_C-\rho_2 g h_2-p_0=0$$

$$\therefore p_C=\rho_2 g h_2+p_0 \tag{1.2}$$

因为 B 点和 C 点高度相同，所以两处所受到的压强也相等，即 $p_B=p_C$。

由此可见，等式（1.1）和（1.2）相等，那么 A 点的**绝对压强**则等于

$$p_A=\rho_2 g h_2+p_0-\rho_1 g h_1$$

$$=g(\rho_2 h_2-\rho_1 h_1)+p_0 \tag{1.3}$$

另外，将等式（1.3）中右侧的 p_0 移项到左侧，则得出 A 点的**表压**（相对压强）为

$$p_A-p_0=g(\rho_2 h_2-\rho_1 h_1) \tag{1.4}$$

6. 作用于平面墙壁的压力

畅游水族馆




这个巨型水槽长35米，宽27米，深度为10米，能够容纳7500立方米，也就是7500吨水！水槽正面的丙烯酸玻璃高8.2米，宽22.5米，厚度为60厘米，据说防护板的重量达135吨……
好大
白石的眼光都绿了！
能制作出可以承受7500吨水压的防护板……真了不起啊……
7500吨……太大了，真难以想象。
到底能有多大呢？
一头大型非洲象的质量大约是7.5吨，所以……
水槽内水的质量相当于大约1000头非洲象的质量啊！
哇
等等！如果破裂的话，我们岂不是都要去极乐世界报到了……
不会有问题的啦。这可是经过精密计算、认真设计制成的。
噢……
首先，我们用P来表示水槽防护板受到的“压力”，那么压力的计算公式如下：
$P=\rho g\bar{h}A$
压力P等于流体的密度ρ乘以重力加速度g乘以到重心位置的深度$\bar{h}$再乘以墙壁的面积A所得到的数值。
哎？
压力P，我怎么听起来这么耳熟啊……
$\bar{h}$
P
重心
A
所谓重心，简单的说就是指墙壁的正中心。



对了！
我想起来了。压强p乘以面积A就得到了压力。
压力 = 流体的密度 × 重力加速度 × 到重心的深度 × 墙壁的面积
重心的压强（$\rho g\bar{h}$）
也就是说，因为$\rho g\bar{h}$表示墙壁重心的压强，
可得出压力的计算公式$P=\rho g\bar{h}A$。
小型水槽
P $\bar{h}$ A
$P=\rho g\bar{h}A$
大型水槽
P $\bar{h}$ A
$P=\rho g\bar{h}A$
随着水槽体积的增大，$\bar{h}$和A的值也就相应变大，P也就会变大。
为了能够承受巨大的压力P，水槽壁也就不得不增厚。
的确如此！
水族馆的防护板也是非常厚实的
听你们这么说，水族馆也是个让人感慨万千的地方呢……
噢——
曼塔鱼的肚皮真是雪白的吗？

7. 浮 力

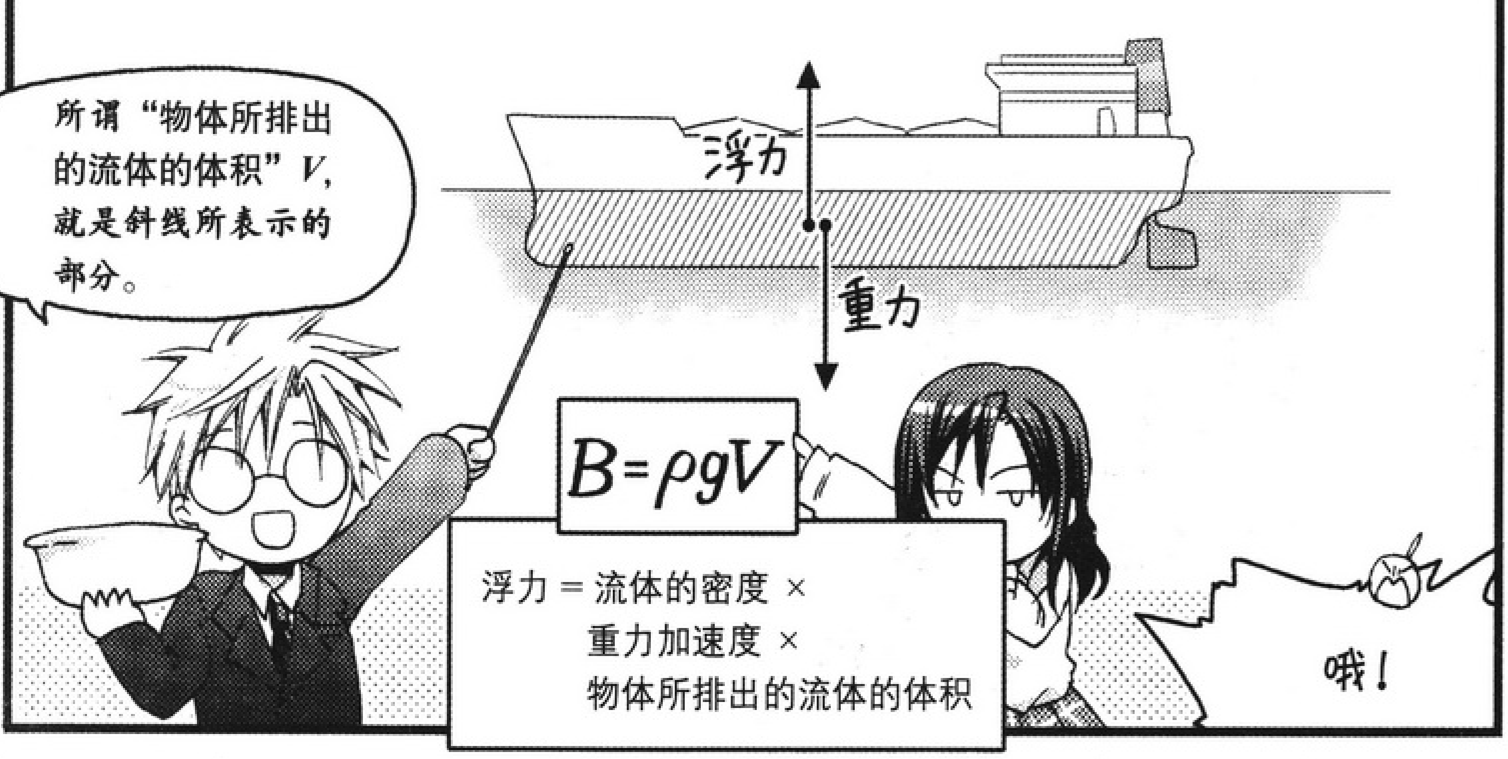
为什么船只不会沉没呢？

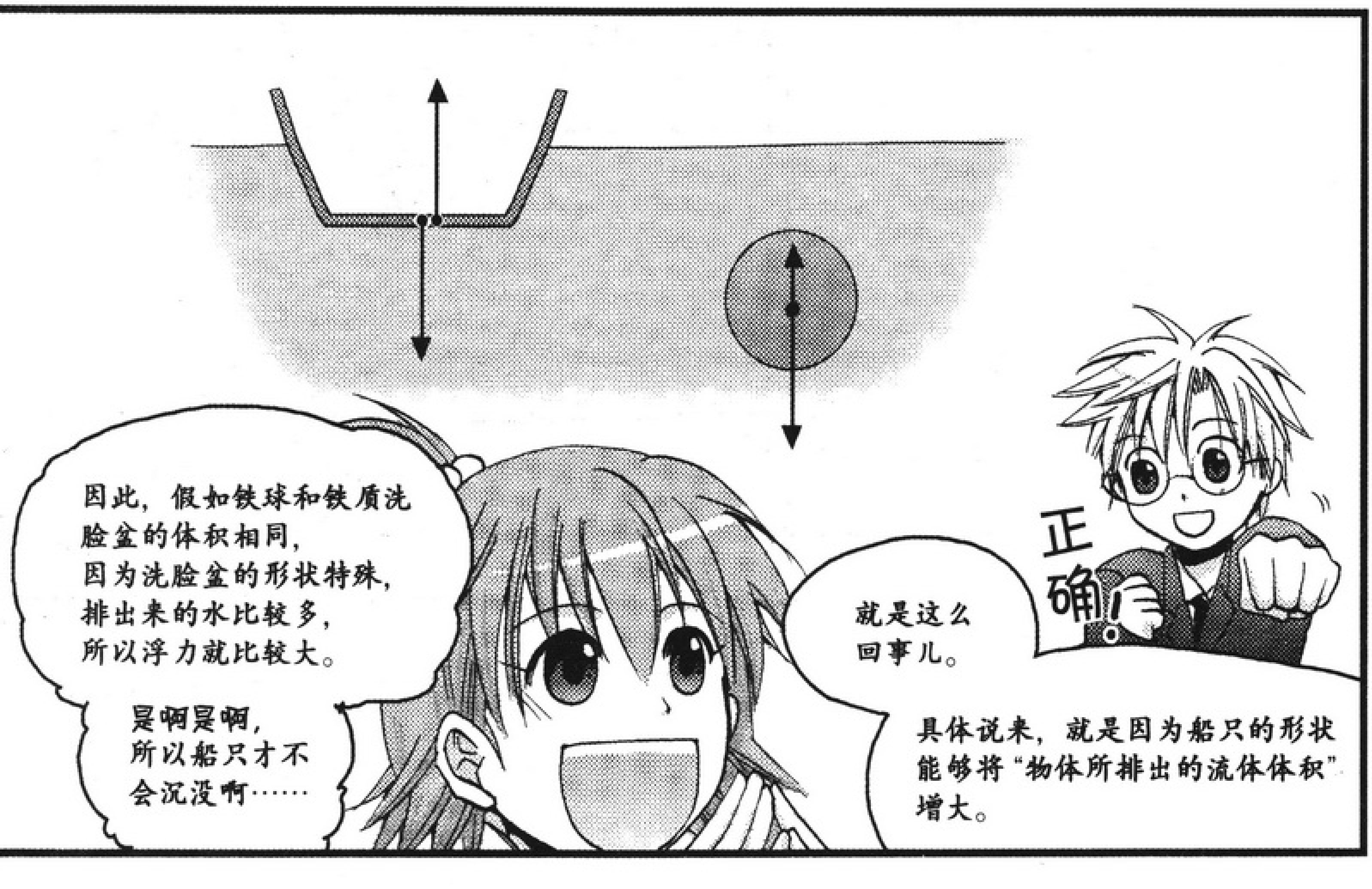




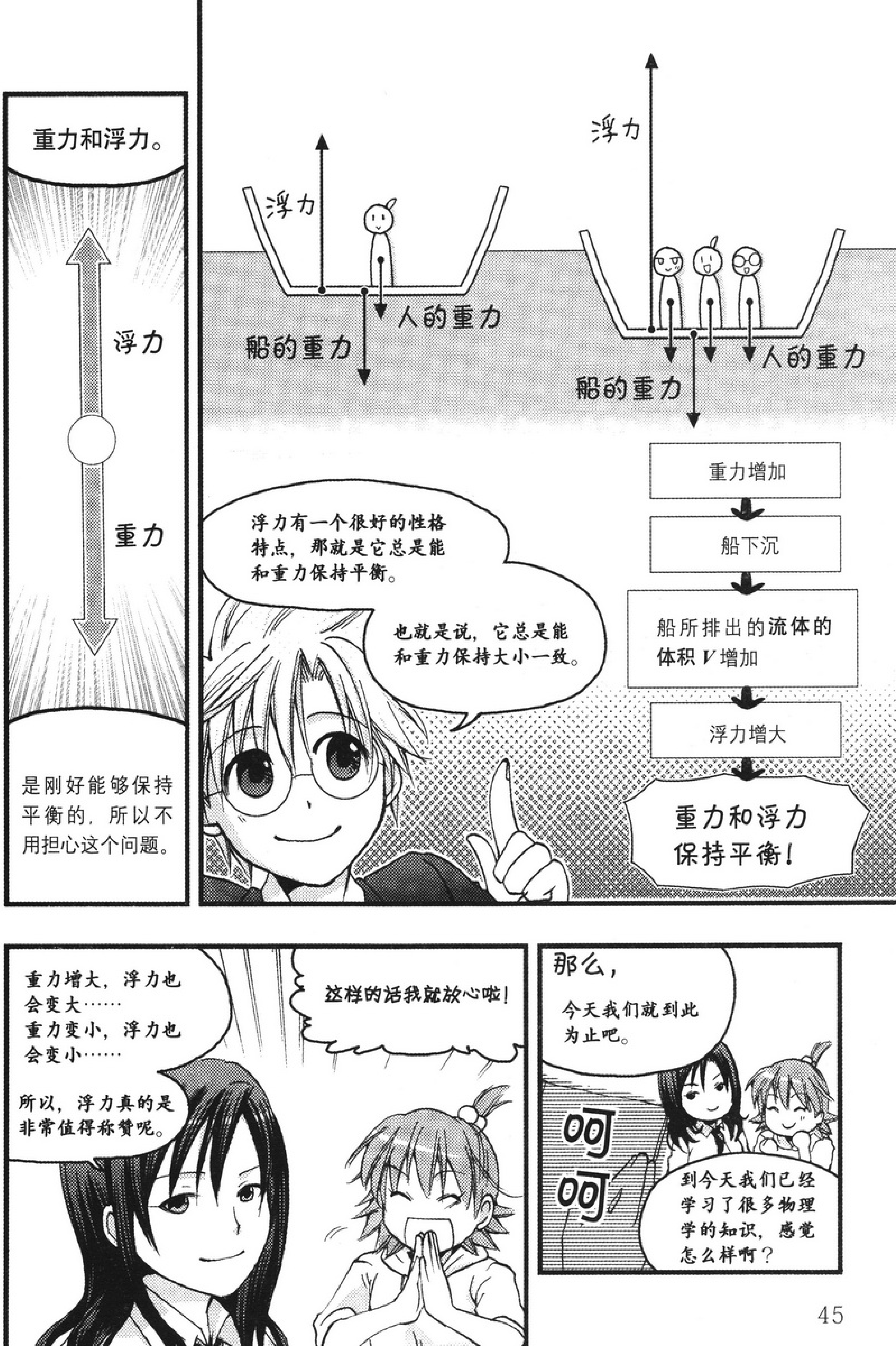



没错，绘布，你想象一下洗澡堂的情形。
把洗脸盆放在浴池里，就算用力往下压，它也不会沉入水底。
嘿
这么说来好像的确有这么回事……
的确……洗脸盆是不会沉入水里……
往下压洗脸盆……
好像浴池里面有一股力量往上顶着似的……
？
就是这么回事，绘布。
这股力量就是支撑着船只不下沉的力量——
浮力！
浮力的大小等于“物体所排出的流体的重力”，方向垂直向上，用符号 B 表示，
其计算公式是 $B=\rho gV$。
ρ 是“流体的密度”，V 是“物体所排出的流体的体积”。
浮力
固体
重力
海水
噢……
这里需要注意的是，这个 ρ 是流体的密度，不是固体（洗脸盆、船只等）的密度。
而这里所说的流体的密度，就是海水的密度。


所谓“物体所排出的流体的体积”V，就是斜线所表示的部分。
浮力
重力
B=ρgV
浮力＝流体的密度 ×
重力加速度 ×
物体所排出的流体的体积
哦！


因此，假如铁球和铁质洗脸盆的体积相同，
因为洗脸盆的形状特殊，
排出来的水比较多，
所以浮力就比较大。
是啊是啊，
所以船只才不会沉没啊……
正确！
就是这么回事儿。
具体说来，就是因为船只的形状能够将“物体所排出的流体体积”增大。


那……那么，如果船上装的不仅仅是空气可怎么办？
人呢？货物呢？
如果人和货物的重力超过了浮力的大小，那船不就要沉没了嘛！！
!?
绘布，
不要这么激动！


重力和浮力。
浮力
重力
是刚好能够保持平衡的，所以不用担心这个问题。
浮力
人的重力
船的重力
浮力
人的重力
船的重力
重力增加
船下沉
船所排出的流体的体积V增加
浮力增大
重力和浮力保持平衡！
浮力有一个很好的性格特点，那就是它总是能和重力保持平衡。
也就是说，它总是能和重力保持大小一致。
重力增大，浮力也会变大……
重力变小，浮力也会变小……
所以，浮力真的是非常值得称赞呢。
这样的话我就放心啦！
那么，
今天我们就到此为止吧。
呵呵
到今天我们已经学习了很多物理学的知识，感觉怎么样啊？



嗯！
学的轻松快乐，
而且简单易懂。
白石真是
了不起！
只要你能轻松愉快
地学到知识，我就
很高兴啦！
嗯……
可是啊……
看到旅行社的宣传册，我还打算去旅游呢……看来还是不要去了，就我一个人太寂寞了！
我们一起去旅游吧，阿茜学……姐！
哇
啊
！
OKINAWA
旅、旅游……去哪里？
做什么呢？
还是那句话，学习不
如习惯的好！
让我们在大自然中亲身
感受流体力学吧！
我、我也赞成一起
去旅游……
一闪一闪
眨一眨
嗯……
那……
那好吧。
！
但是，即使要去，也
只能利用这次黄金周
的时间了。



这次的连休就
交给我吧！
我要制作出最完美的
旅行计划！
哈哈！！
那今天就到此结束！
大家辛苦了！
……旅行计划，
绘希这个家伙，
不会又要等到最后一
天才会透露这个秘密
计划吧？
……虽然我很期待，
但是怎么内心有些
不安呢……
哼
旅行，旅……行……
哼
哼
哼
哼
那要去哪里呢？

第2章

流动的基础方程式



1. 流体力学中使用的各种专业术语



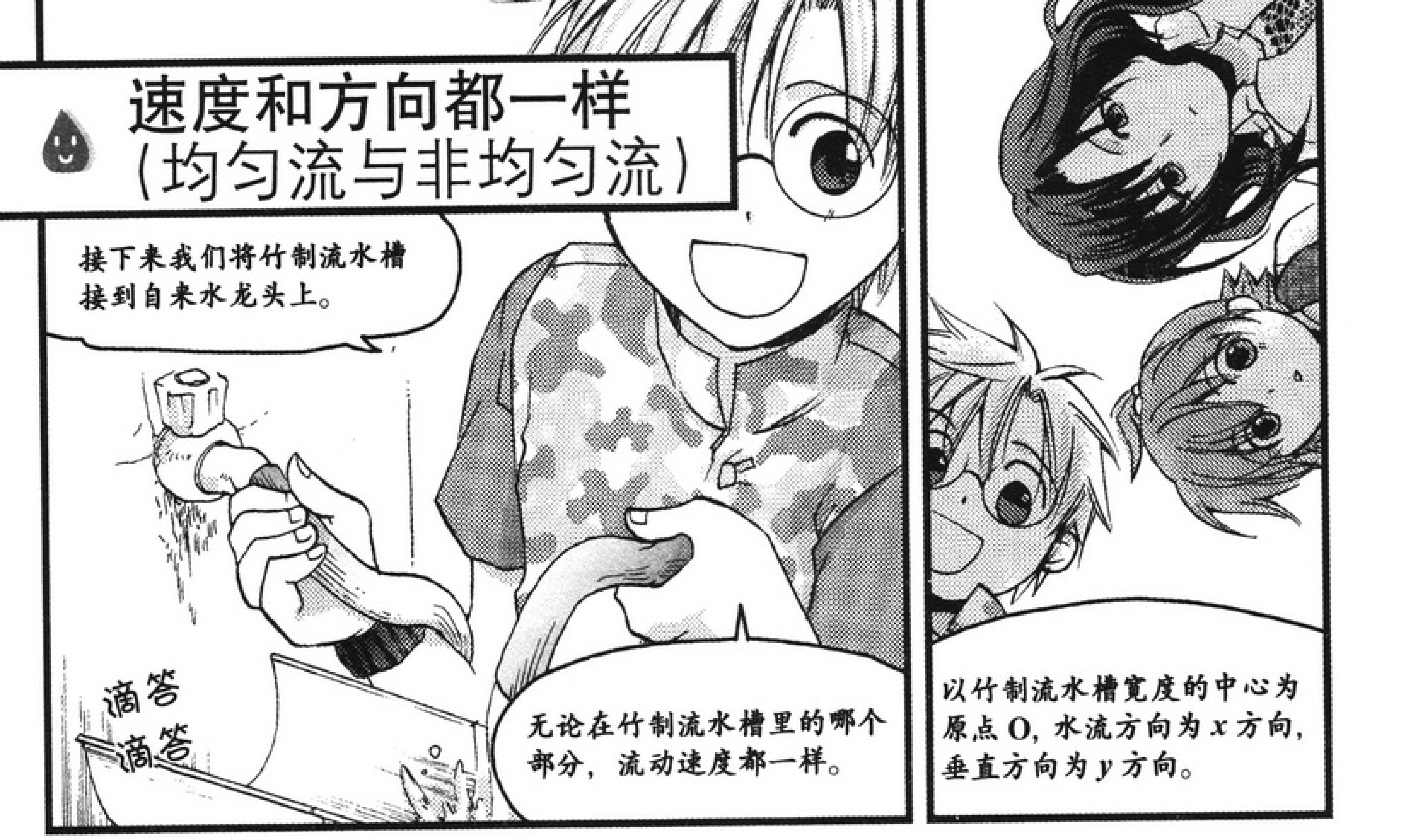


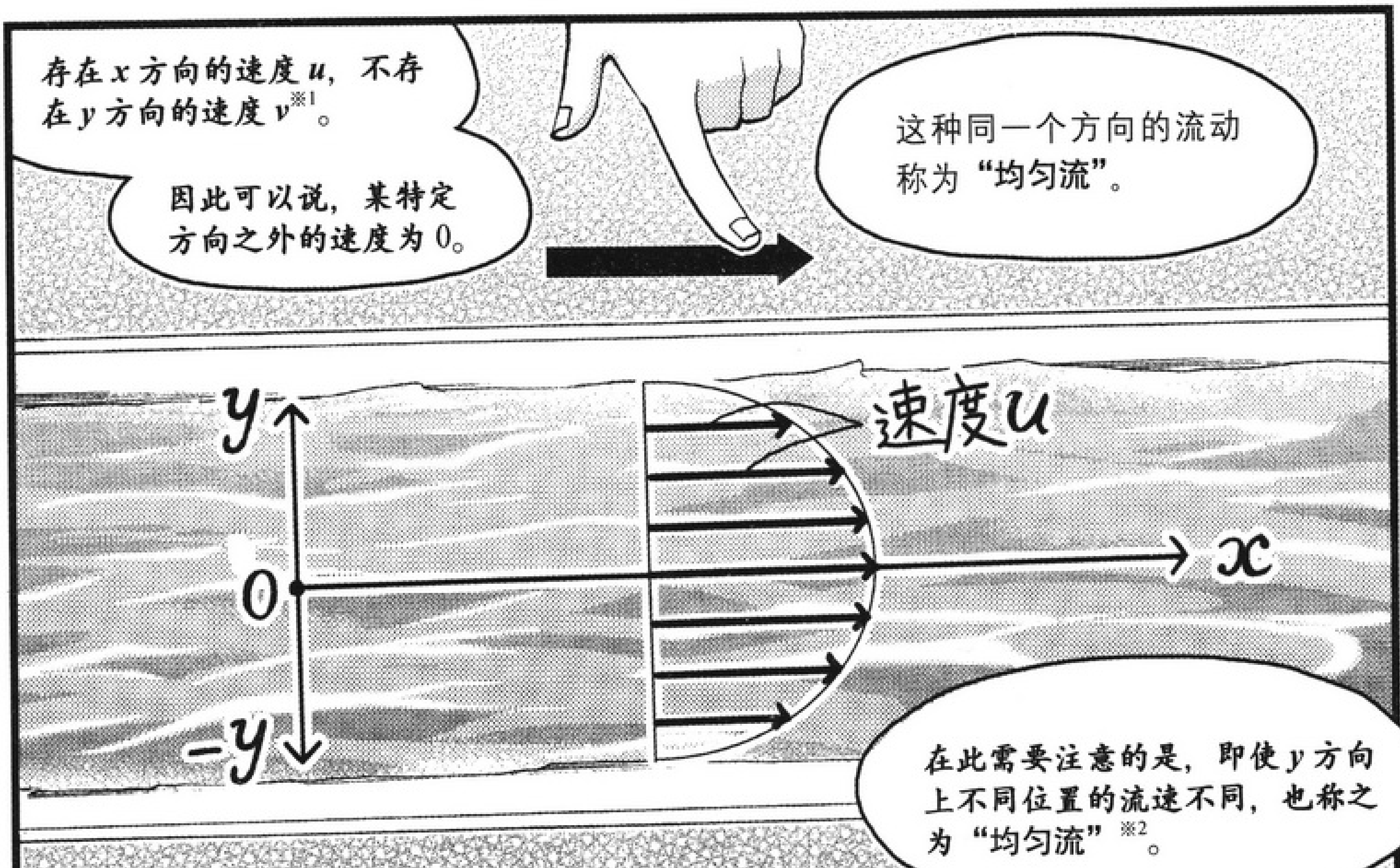
※ 日本一种拉面的吃法。据说这种吃法只有在鹿儿岛才有。具体吃法是：先将拉面放进旋转流水槽里，让拉面跟着水或者冰水一起转，然后将面捞出，放进已经调配好的调料碗里就可以吃了——译者注。

没有变化（定常流与非定常流）



速度和方向都一样（均匀流与非均匀流）





※1 严格来说，其实存在速度非常小的 v，在此我们忽略不计。

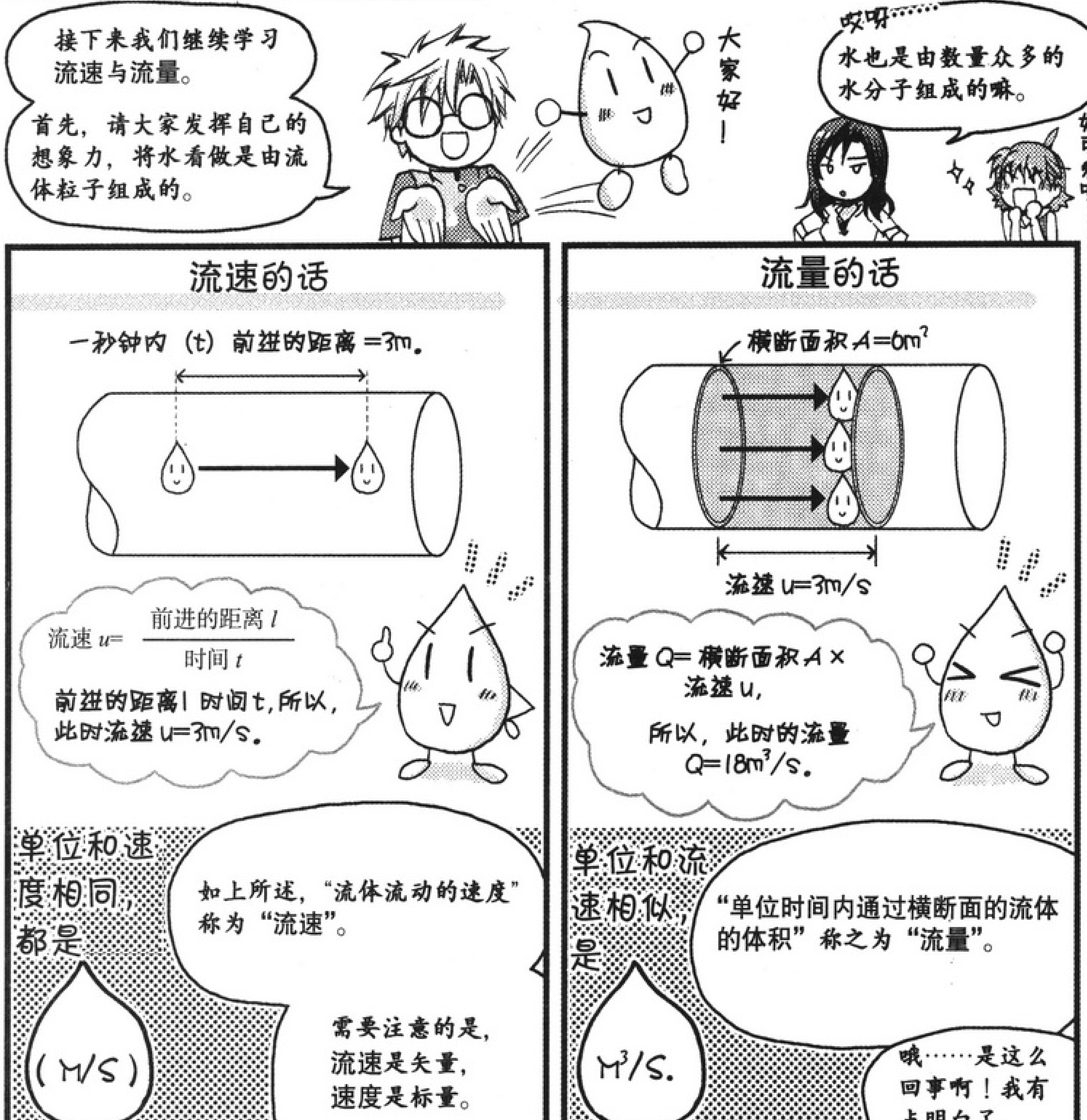
※2 为什么 y 方向上不同位置的速度会不同，请参看本书第 107 页。





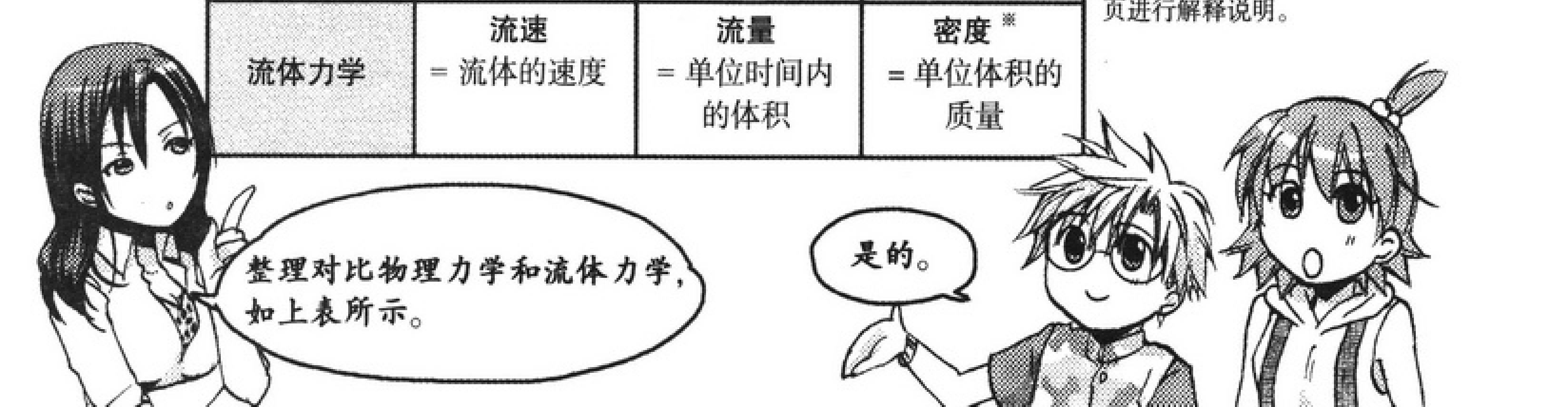
啪
啪
啪
水流的变化……
基本上看不出来啊。
是啊。
那么，我们再用上这个！
使看不见的水流现身的办法……也就是“流动可视化”。
强力粉
强力粉？
现在只有x方向的速度u的“均匀流”，
将擀面杖放进水流中，大家请注意观察其后方的流动是什么样子……
哦……
变了，变了！
现在不仅仅只有x方向的速度u了。
是这么回事。
这种情况下，可以说水流除了存在某一特定方向的速度外，还存在其他速度。
也就是说，不仅存在x方向的速度u，还存在y方向的速度v。
y
0
-y
x
速度v
擀面杖
速度u
是这么回事啊！
除了某一确定方向的速度以外，还存在其他速度，这样的流动称之为“非均匀流”。

流体粒子闪亮登场（流速与流量）



物理力学	速度	体积	质量
流体力学	流速 = 流体的速度	流量 = 单位时间内的体积	密度※ = 单位体积的质量

※ 在考虑流体质量的时候，用密度来表示，具体内容在本书第 73 页进行解释说明。



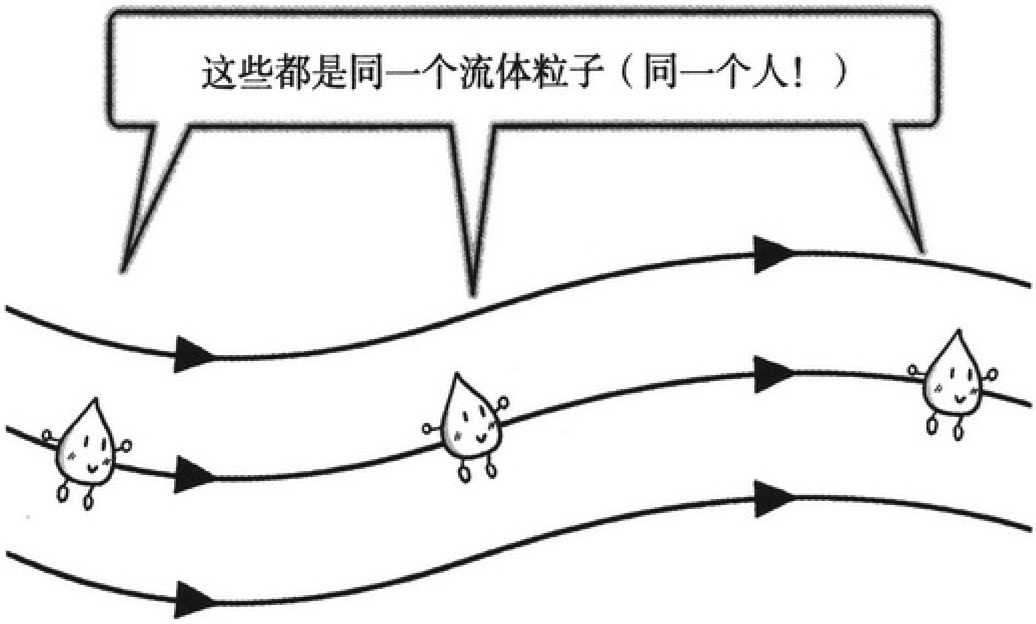
追踪？伏击？（拉格朗日法与欧拉法）

我们在这里介绍两种观测流体流动的方法。

拉格朗日法和欧拉法。

要想观测流体的流动，就必须观测流体粒子。

那如何观测流体粒子呢？来看一下它们的不同。



拉格郎日法

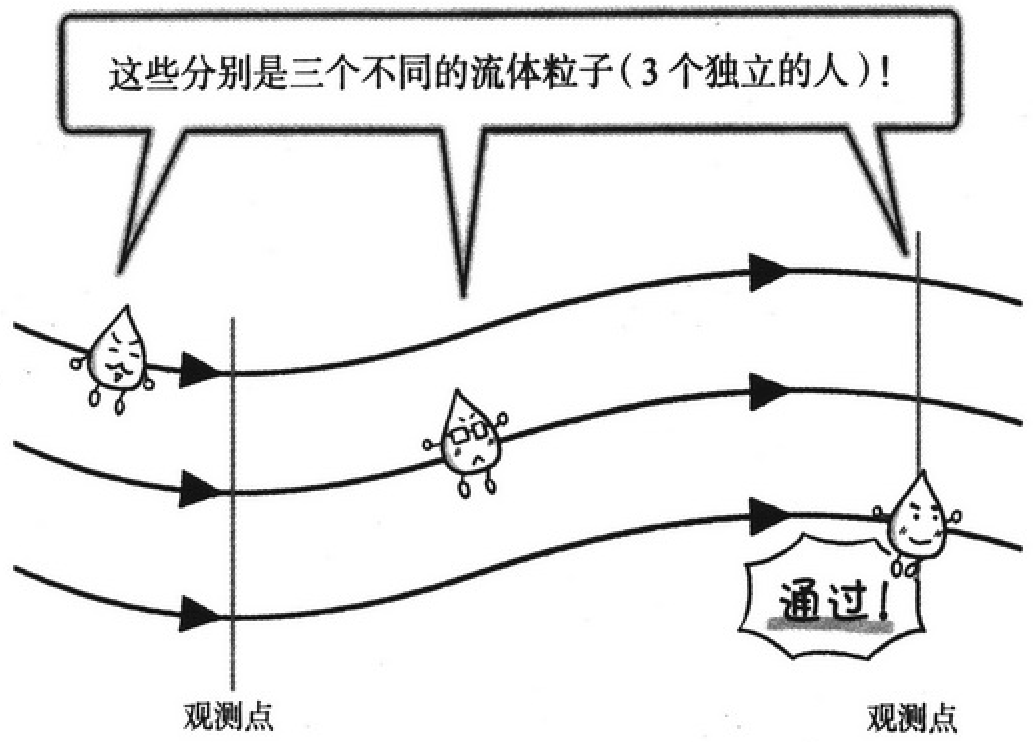
所谓**“拉格朗日法”**，就是一直跟踪观察同一个流体粒子的方法。

嘿嘿嘿嘿……

听起来像是恐怖兮兮的间谍跟踪！

不是的，打个什么比方才合适呢……

简单来说……就像跟着某位马拉松选手一起跑，并对其进行观察一样。



欧拉法

所谓“**欧拉法**”，就是持续观测特定的位置，并测量通过其中的流体粒子的方法。

嘿嘿嘿嘿……
就像埋伏在车站，偷偷地盯住每一个来往的人一样……

这个比喻怎么都让人觉得不太舒服……

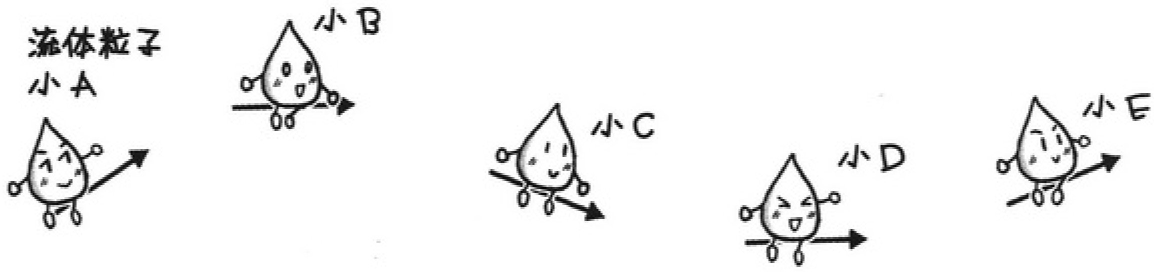
嗯。
就像在某个特定地点观测马拉松选手的状态一样。

这样的线、那样的线（流线、迹线与流管）



我们已经认识了流体粒子，接下来我们说说**“流线”**、**“迹线”**和**“流管”**。
首先，请大家闭上眼睛。

流体粒子、流动都处在运动中。
猛的睁开眼睛，你会发现有 5 个流体粒子小 A 到小 E 就在你眼前，他们正顺着箭头的方向依次前进。

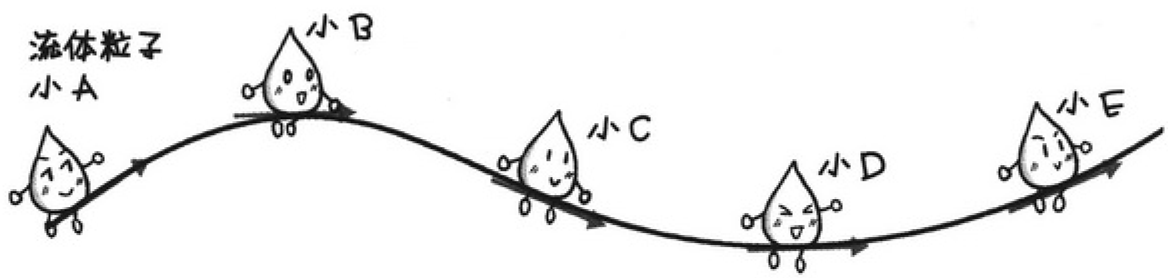




将这些流体粒子的箭头用圆滑的线连接起来。



那么……就像这样？



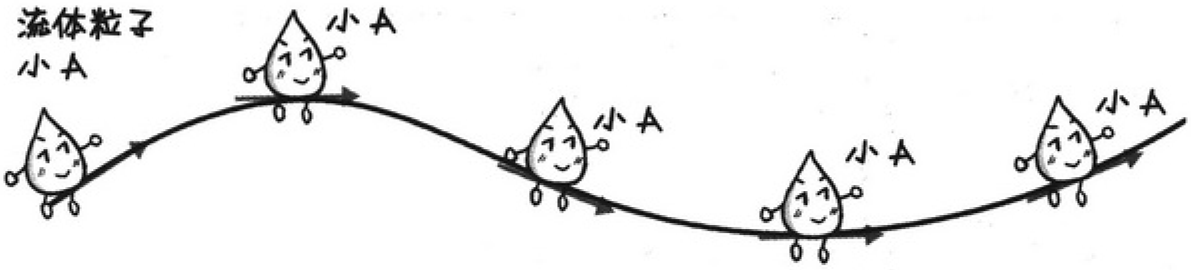


是的。简单来说，这条连接起来的线就是**“流线”**。
这样小 A 到小 B 之间的流动、整体的流动等等，就容易想象，容易理解了。



嗯。也就是说，将速度矢量用线连接起来，画成曲线，这就是流线。

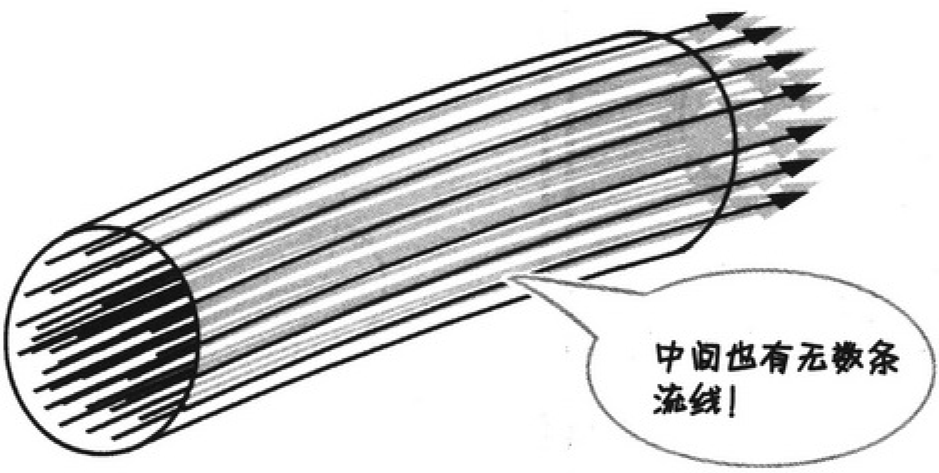
很容易跟流线混淆的一个概念，就是**“迹线”**。
在此之前我们刚刚介绍过拉格朗日法，追踪同一个流体粒子随着时间的推移而运动的轨迹。而连接这个轨迹的曲线就是“迹线”。



也就是连接小 A 单独前进轨迹的线啊。

如果流动为定常流，那么流线和迹线一致，当流动为非定常流时，流线和迹线则不一致。

另外，假想将刚才说到的流线（不是迹线）按照合适的数量集结成管，这种假想的管道就叫**“流管”**。流线不会相互交叉。



流线、迹线、流管……各不相同呢。

特别是**流线**，以后还会经常提到！请一定要牢牢地记住。

玩水明白的知识（作用于流体的力）





静止……
旋动流体的力
摩擦力
……转动慢慢停止了，这是什么力的作用？
是与内壁之间的摩擦力
……啊！
是这么回事啊。
那么，最后，绘布。
请将手臂放进水中，逆着水流方向晃动手臂。
水流就像刚才一样，流动方式会有所改变。
嗯嗯，水里冰凉凉的，真舒服……
河水的流动
水受到来自手臂的外力
手臂受到来自水的反作用力
手臂的运动方向
也就是说，水流受到手臂的作用力而改变了流动方式，作为其反作用，手臂也受到了水的作用力。
这样就明白了流体也会受到来自外部的力——外力的作用了。
可是，这到底是这么回事呢？
哎？
重力、摩擦力、外力
这些当中哪个是……
啊！啊！


与作用于物体的3种力是一样的！
本来流体力学就是以物理力学为基础的嘛……
除了这3种力之外，还有垂直作用于物体表面的压力、以及引起错动的剪切力等等（详细请参考本书第63页）。
跟物体一样，所有这些力也在流体内部产生作用。
哎……
物体和流体受到同种的力的作用啊……
……这是怎么回事呢？
事情是这样的。
物理力学中很多定律同样适用于流体力学。
啊
例如质量守恒定律中的能量守恒定律和动量守恒定律……作为物理研究部的成员，这些定律名称总听说过吧？
定、定、定律啊……
好难！
不要担心，绘布。
今后我们还会详细地介绍流体力学中的重要定律！！
一起努力吧！
拜托你了白石，真是太感谢你了！
现在开始正好让乌冬面团醒一醒！
等我们讲完了，就差不多醒好了。
好！
无论走到哪里都忘不了吃……

让扑克牌发生错动变形来看看（剪切力）

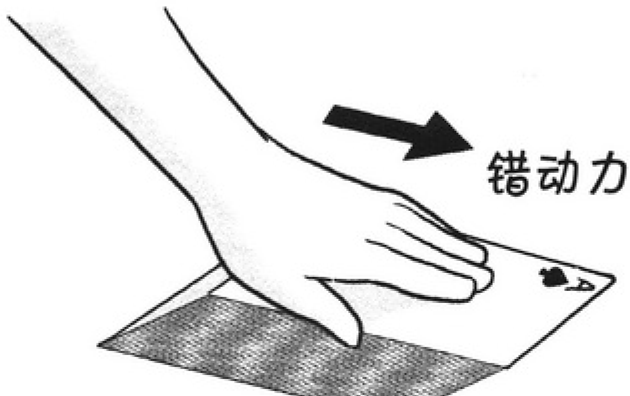



喂，白石，刚才你说到了**“剪切力”**这个单词，我在物理力学中也学到过。这到底是怎样一种力啊？


所谓剪切力，就是**导致产生错动的力**。与物体相同，流体内部也存在这种作用力。


错动变形……嗯！为什么一下子想象不出来是什么样子呢？


这里有一副扑克牌。
将手放到最上面那张扑克牌上，用力使其错开……看！下面的扑克牌也被最上面那一张带着一起错开了。

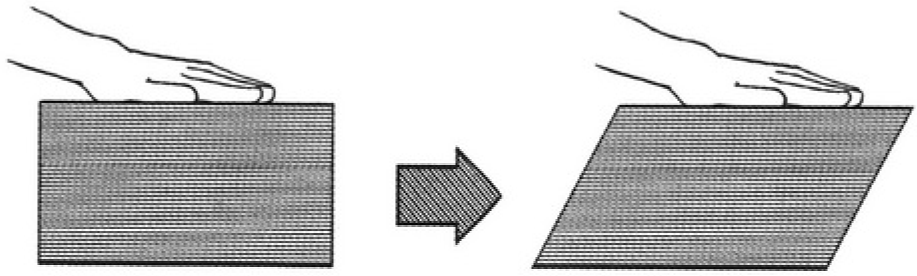


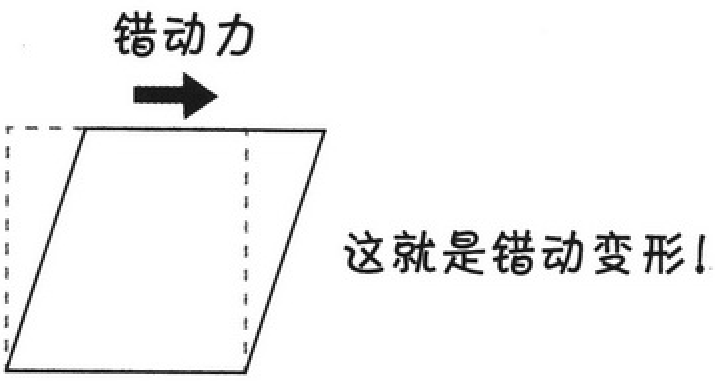

此时，**产生于内部、导致错动的力**，就是剪切力。



嗯。从正侧面观察比较容易理解。

受到错动力的作用，整副扑克牌都变成了平行四边形。



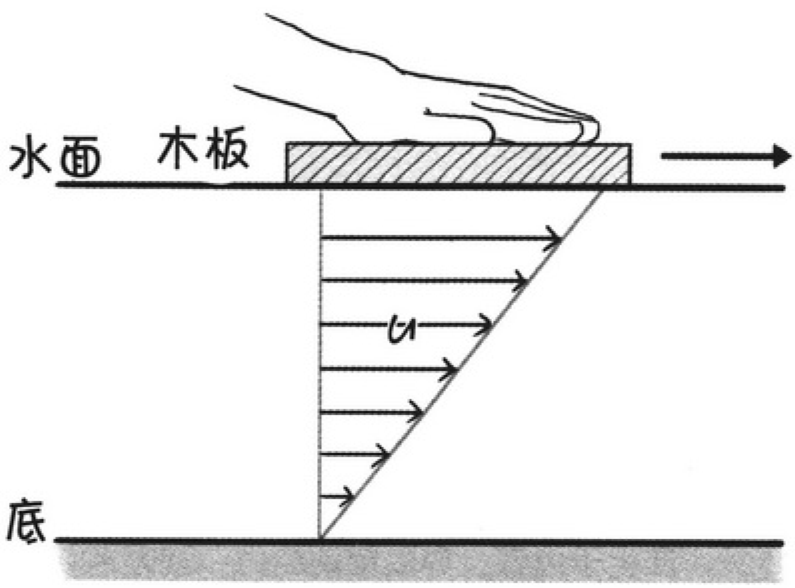




那么接下来我们看看具体到流体中是什么情况。

在水槽的水面上放一块木板，用力推动木板，并进行观察。

从水槽的正侧面进行观察的话，流速 u 的分布情况如下图所示。

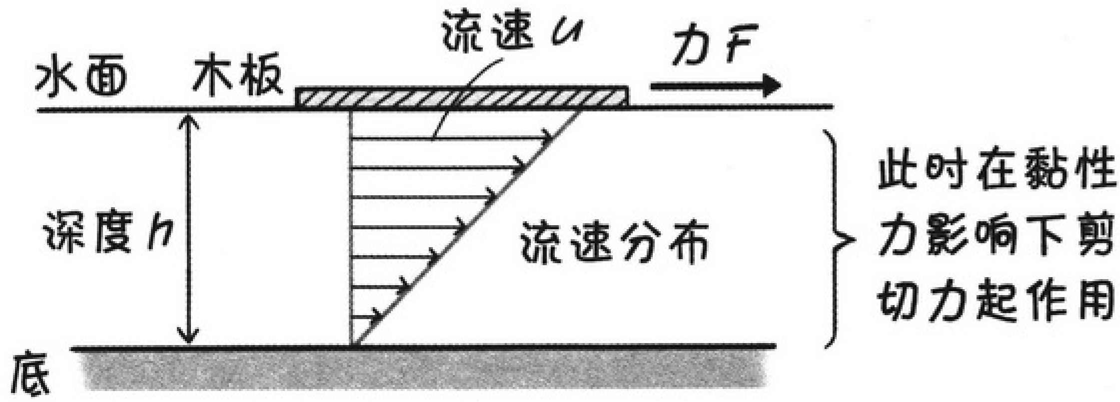




原来如此。
最上方受到拉力的作用最大，越朝下，错开的幅度越小。
从水面开始，随着深度的增大，流速也有相应的变化。



此时产生的力，就是错动力。



水面移动引起水下流速分布不同



今天的话题总结归纳如上图。
今后流速分布图还将多次出现，请大家先适应为好。
关于**黏性**和**黏性力**，将在今后的章节中进行详细说明。
（关于黏性的知识，请参考本书第 98 页）



知道了！

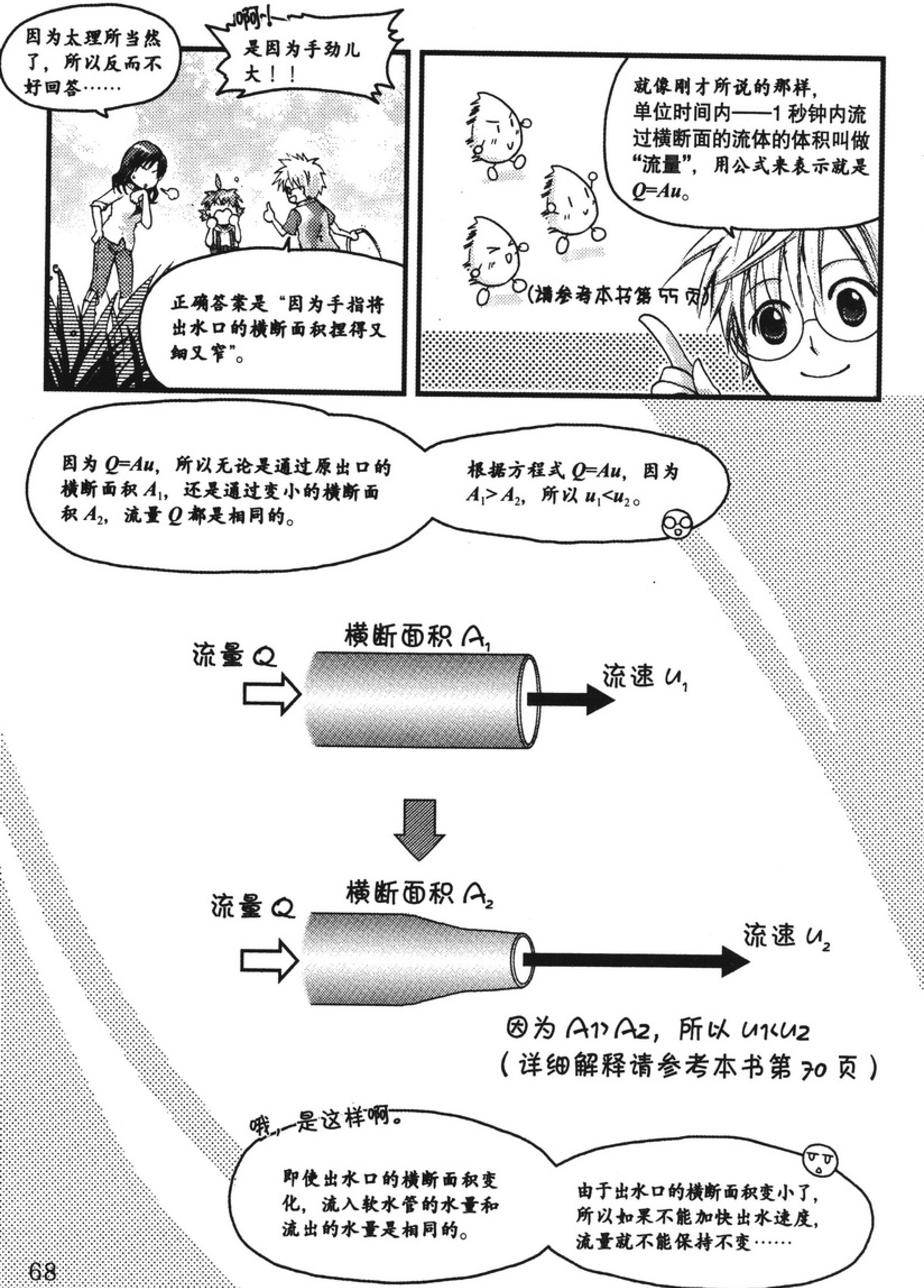
2. 连续性方程

没有神秘失踪这回事（质量守恒定律）





事实就是这么回事。
如果在途中消失了的话，
不就成了神秘失踪了嘛！
嗯
嗯
噢
虽然是理所当然的事情……可这是为什么呢？
事实上这就是流体的质量守恒定律，就是这么简单！
怎么回事？
这么理所当然的事情就是定律？
流体力学中这一定律也被称作“连续性方程”。
啊！
太简单了……
能有用吗，这个定律？
正因为简单，才不能忘噢！
利用这个定律，可以进行各种各样的计算。
例如……
哇噢！
要想把水冲到很远的地方，就要这样抓住软水管。
嗤~
为什么这样做就能够把水冲到远处呢？


因为太理所当然了，所以反而不好回答……
啊！
是因为手劲儿大！！
正确答案是“因为手指将出水口的横断面积捏得又细又窄”。
就像刚才所说的那样，单位时间内——1 秒钟内流过横断面的流体的体积叫做“流量”，用公式来表示就是 $Q=Au$。
(请参考本书第55页)
因为 $Q=Au$，所以无论是通过原出口的横断面积 A_1，还是通过变小的横断面积 A_2，流量 Q 都是相同的。
根据方程式 $Q=Au$，因为 $A_1>A_2$，所以 $u_1<u_2$。
横断面积 A_1
流量 Q
流速 u_1
横断面积 A_2
流量 Q
流速 u_2
因为 $A_1>A_2$，所以 $u_1<u_2$
（详细解释请参考本书第70页）
哦，是这样啊。
即使出水口的横断面积变化，流入软水管的水量和流出的水量是相同的。
由于出水口的横断面积变小了，所以如果不能加快出水速度，流量就不能保持不变……



当
当
流量
原来的流速
变化后的流速
$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2$$
软水管原来的横断面积
变小的横断面积
公式来表示“连续性方”则如上图所示。
从这个公式可以看出，如果流量一定，那么横断面积越小，流速越快。
这个所谓“连续性方程”，就是用公式来表示的质量守恒定律。
这里有 3 点需要注意！关于这个“连续性方程”，软水管内的①定常流动，②密度恒定，③沿着流线成立。
(关于流线，请参考本书第 58 页)
如果是定常流，那么
流入量 Q_1
$Q_1 = Q_2$.
ZOOM!
恒定
沿着流线成立
单位体积流体粒子的数量相同 = 密度恒定
质量不会随着时间的变化而变化 = 定常流
流出量 Q_2
用图来表示的话，则如上图所示。
是这样啊……我都做好攻坚的心理准备了，没想到这么简单。
又有 A，又有 u 的，我还以为很难学呢！
白石，你可有点心地不良哈～
咣
哈！！
……心地不良的是你吧，绘希！
成落汤鸡了

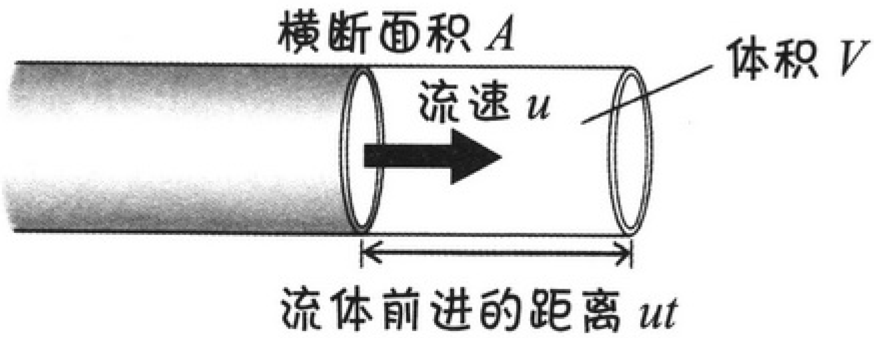
补充说明



~关于连续性方程~

现在我们对连续性方程进行详细地解释说明。

为什么在流量相同的情况下，横断面积越小，流速就会越大？如下图所示，假设流水管的横断面积是 A，流水管中水流的流速是 u，求流量的大小。



在时间 t 内从流出的水的体积 V，其计算公式如下：

$$V = uAt$$

（流速 × 横断面积 × 时间）

流量 Q　（单位时间内流出的体积）

因此，单位时间内（1 秒钟内）流出的体积——流量 Q，是体积 V 与时间 t 的比值。

$$Q = \frac{V}{t} = uA$$

流量　（流速 × 横断面积）

另外，如果知道了流量 Q 和横断面积 A，那么可以根据流速 $u=Q/A$（**流速 = 流量 ÷ 横断面积**）求得流速。

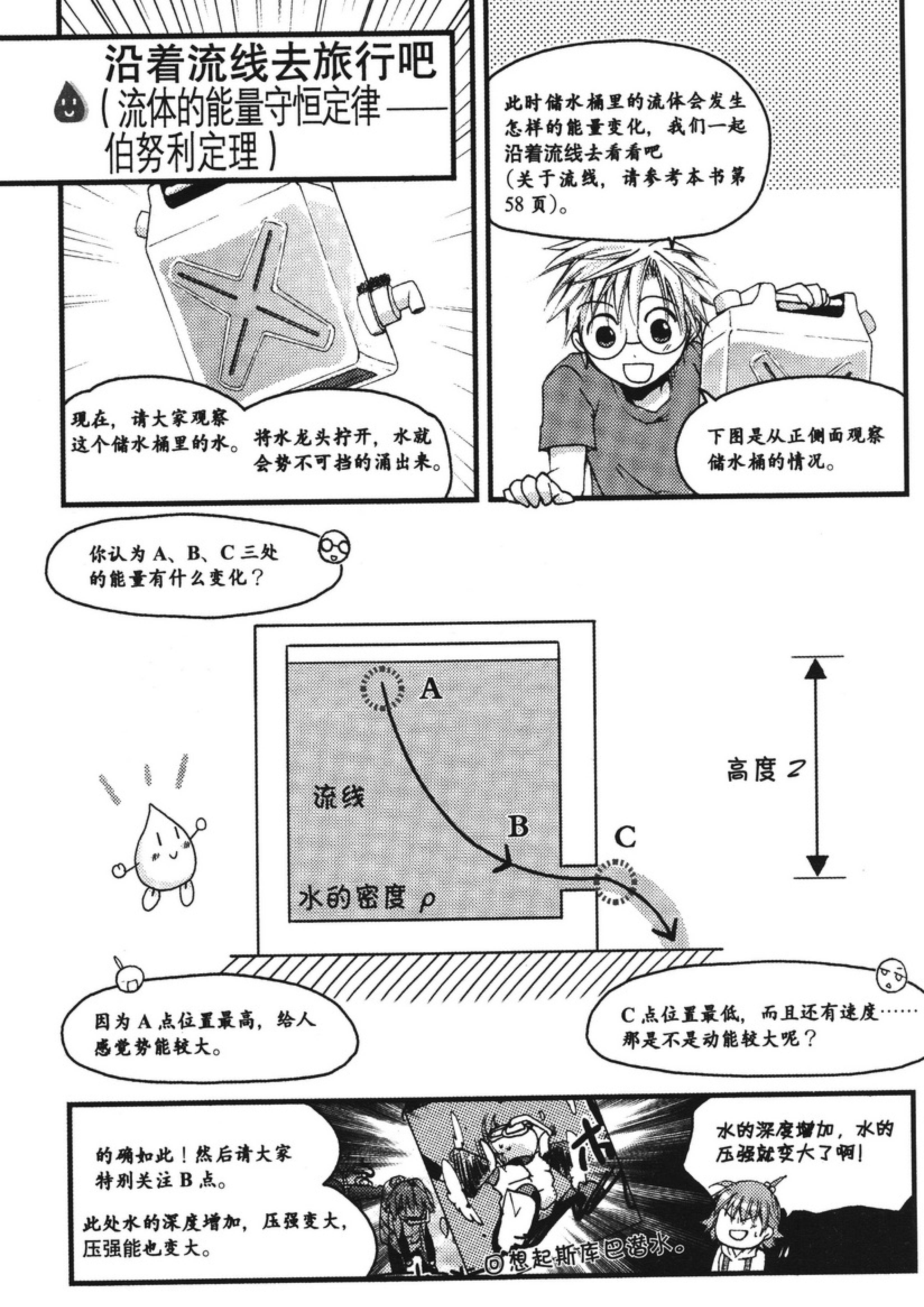
请大家认真观察这个公式，不难发现 u **和** A **成反比例关系**。

因此，在流量 Q 相同的情况下，横断面积 A 越小，相应的流速 u 就越大。

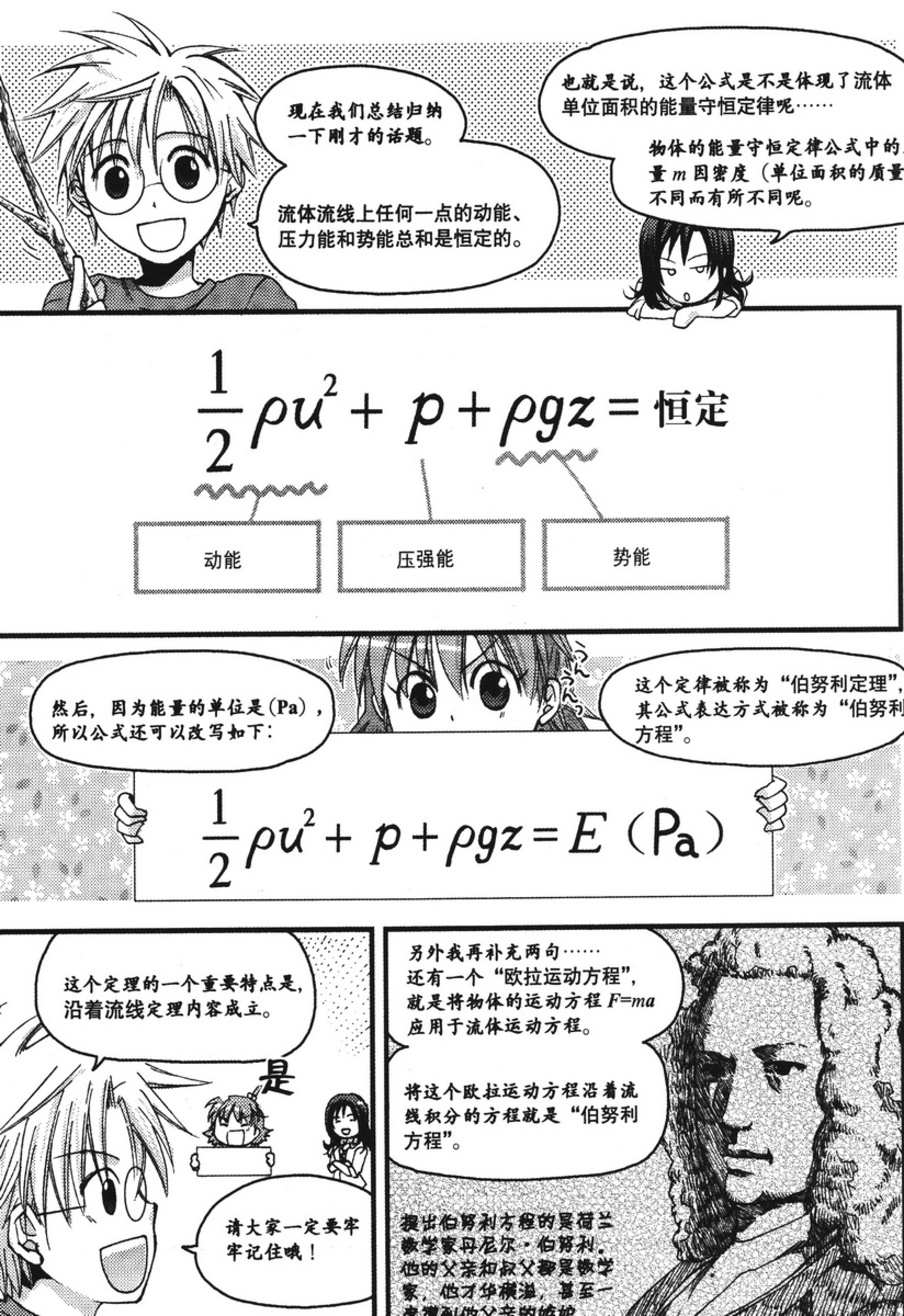
3. 伯努利定理

一起去坐过山车吧（物体的能量守恒定律）




沿着流线去旅行吧
（流体的能量守恒定律——伯努利定理）
现在，请大家观察这个储水桶里的水。
将水龙头拧开，水就会势不可挡的涌出来。
此时储水桶里的流体会发生怎样的能量变化，我们一起沿着流线去看看吧
（关于流线，请参考本书第58页）。
下图是从正侧面观察储水桶的情况。
你认为A、B、C三处的能量有什么变化？
A
流线
B
C
水的密度 ρ
高度 z
因为A点位置最高，给人感觉势能较大。
C点位置最低，而且还有速度……那是不是动能较大呢？
的确如此！然后请大家特别关注B点。
此处水的深度增加，压强变大，压强能也变大。
水的深度增加，水的压强就变大了啊！
回想起斯库巴潜水。


物体能量
=
动能
+
势能
恒定
刚才提到的过山车的能量守恒定律是：
物体的能量＝动能＋势能恒定……
以此类推，实际上，流体的能量守恒定律可以表示如下：
流体的能量＝动能＋压强能＋势能是恒定的。
New!!
流体的能量
=
动能
+
压强能
+
势能
恒定
这里需要注意的一点是能量守恒定律在流线上成立。
哇——
意思是说，无论是流线上A、B、C三点中的哪一点，流体的能量总和都是相同的……
另外，因为流体的形状不固定，所以关于质量 m，我们用密度 ρ 来考虑这些能量。
绘希，什么是密度来着？
这个
啊……啊，
怎么说呢，就是这么大东西的重量！
其实……
密度＝单位体积的物体的质量。



现在我们总结归纳一下刚才的话题。
流体流线上任何一点的动能、压力能和势能总和是恒定的。
也就是说，这个公式是不是体现了流体单位面积的能量守恒定律呢……
物体的能量守恒定律公式中的
量m因密度（单位面积的质量
不同而有所不同呢。
$\frac{1}{2}\rho u^2 + p + \rho gz =$ 恒定
动能
压强能
势能
然后，因为能量的单位是（Pa），所以公式还可以改写如下：
这个定律被称为“伯努利定理”，其公式表达方式被称为“伯努利
方程”。
$\frac{1}{2}\rho u^2 + p + \rho gz = E$（Pa）
这个定理的一个重要特点是，沿着流线定理内容成立。
是
请大家一定要牢牢记住哦！
另外我再补充两句……还有一个“欧拉运动方程”，就是将物体的运动方程 $F=ma$ 应用于流体运动方程。
将这个欧拉运动方程沿着流线积分的方程就是“伯努利方程”。
提出伯努利方程的是荷兰数学家丹尼尔·伯努利。他的父亲和叔父都是数学家，他才华横溢，甚至一

补充说明



~关于能量单位~

那么，在此我们将能量 E 的单位（**Pa**）进行整理说明。

（Pa）曾经作为压强 p 的单位在以前的章节中出现过（请参考本书第 19 页）。

那时的（Pa）=（N/m^2）。可是，**它怎么又成了能量 E 的单位了呢？**为了回答这个问题，首先请看以下等式。

关于能量的单位（Pa）

$$(\mathrm{Pa}) = \left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}\right) = \left(\frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{m}^3}\right) = \left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}\right)$$





（Pa）可以有以上几种变形！

（J）是第一次出现，读作“焦耳”，也是能量的单位。

等式当中 J 用 m^3 来除，m^3 是边长为 1m 的立方体的体积，就是**“单位体积”**的意思……

$$(\mathrm{Pa}) \overset{\text{等于}}{=\!=\!=\!=} \left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}\right)$$



也就是说，Pa 是**单位体积能量**的意思。

刚才我曾经说过，“用密度——也就是单位体积的物体的质量来考虑能量”（请参考本书第 73 页）。

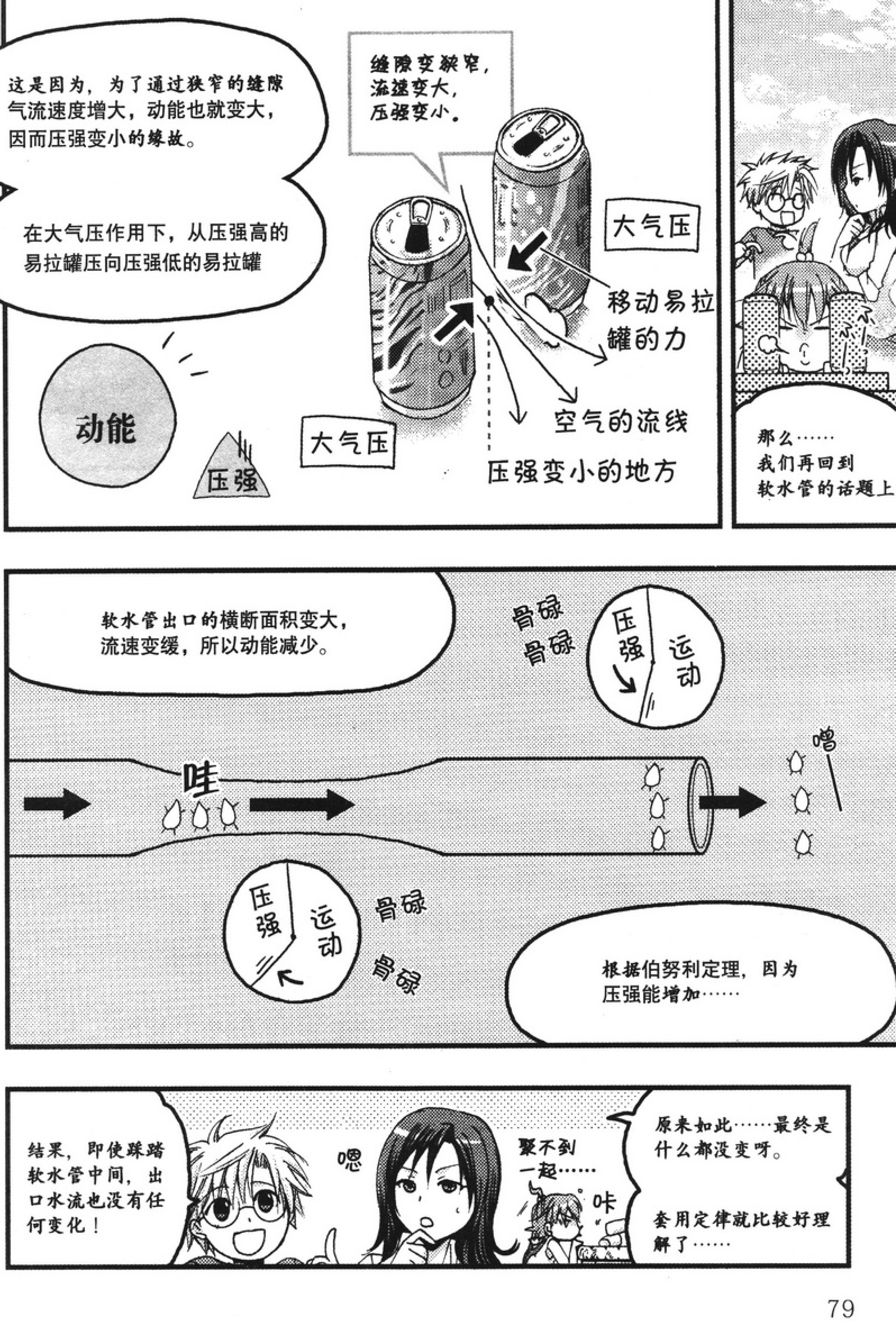
由此可见，Pa 也是能量的单位。

踩踏软水管（流速与压强的关系）




能量
E能量总和
P压强能
$\frac{1}{2}\rho u^2$动能
流速u
因受到踩踏而部分变细的软水管。
如果用伯努利方程式来表示，那么具体情况如下。
因为软水管水平放置，所以势能没有什么变化，如果视高度z=0，那么……
$$\frac{1}{2}\rho u^2+p=恒定=E$$
能量总和为E。
如果平行放置软水管，则情况完全符合之前所讲的连续性方程。
如果软水管的横断面积变小，由于流量恒定，流速会变快，那么动能就会相应增加。
嗯嗯！
就像之前用手指挤压软水管出口的情况一样！
是的！
最后我们再考虑一下压强能。
因为能量的总和恒定，所以动能增加多少，压强能就减少多少。
P= 恒定 =
压强
运动
咯唧
咯唧
减少……


哎……
压强变小了！很意外呢！
是的……
凭直觉，软水管变细，流动困难，压强应该增加才对啊……
但实际上压强却变小了。
为了方便理解，举个例子进行说明！
看
看
空易拉罐？什么时候放了这么多易拉罐在这里啊！
说实话，刚才我偷喝了几罐果汁……
请冲着易拉罐之间的缝隙用力吹气。
是……
是这样吗？
呼
!!?
聚到一起了。
易拉罐被吸到一起了呢！
嘭
嘭！



这是因为，为了通过狭窄的缝隙气流速度增大，动能也就变大，因而压强变小的缘故。
在大气压作用下，从压强高的易拉罐压向压强低的易拉罐
动能
压强
缝隙变狭窄，流速变大，压强变小。
大气压
移动易拉罐的力
空气的流线
大气压
压强变小的地方
那么……我们再回到软水管的话题上
软水管出口的横断面积变大，流速变缓，所以动能减少。
骨碌骨碌
压强
运动
哇
噜
压强
运动
骨碌
骨碌
根据伯努利定理，因为压强能增加……
结果，即使踩踏软水管中间，出口水流也没有任何变化！
嗯
聚不到一起……
咔
原来如此……最终是什么都没变呀。
套用定律就比较好理解了……

4. 动量守恒定律


来玩撞球吧
（动量守恒定律）
不知不觉学习就到最后阶段了。
最后我们讲一下流体的动量守恒定律。
呵呵！
我有个请求！
讲流体之前，请先讲一下物体运动之类的知识吧。
动量守恒定律！
就知道你得问这个问题，我已经提前做好准备啦！
首先用这个撞球来给你们详细讲解物体的动量守恒定律！
当
当
哇噢……是撞球！白石，你准备的真周全啊！
其实我……每天晚上睡觉前都玩这个……
想到今天晚上要是失眠可就麻烦了，所以……
嗯嗯，
我也一样，枕头换了就怎么都睡不着觉。
……我们研究部的成员……怎么都有这样的怪癖……

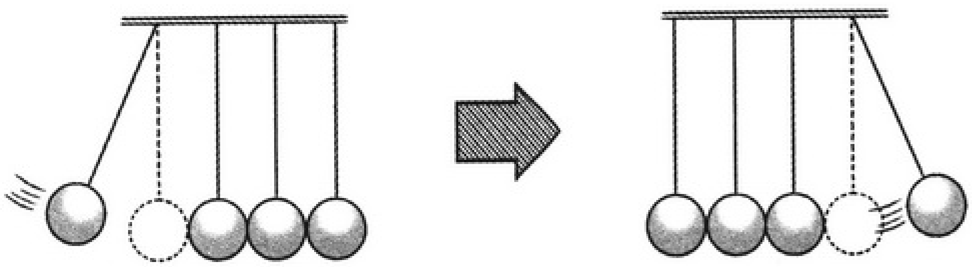




那么，请大家仔细观察撞球。

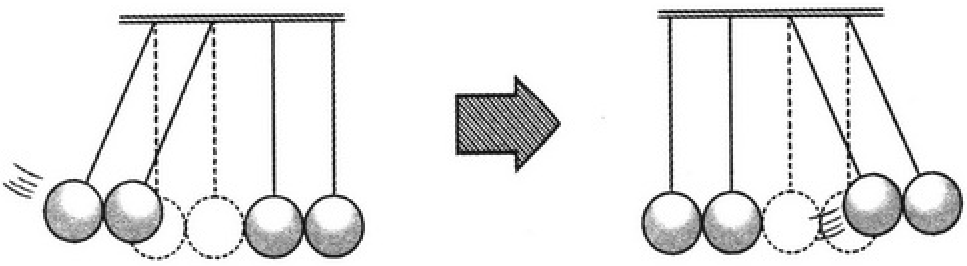
左侧碰撞一个球，右侧将有一个球被弹开。

撞球原来的位置用虚线表示，现在的位置用实线表示。



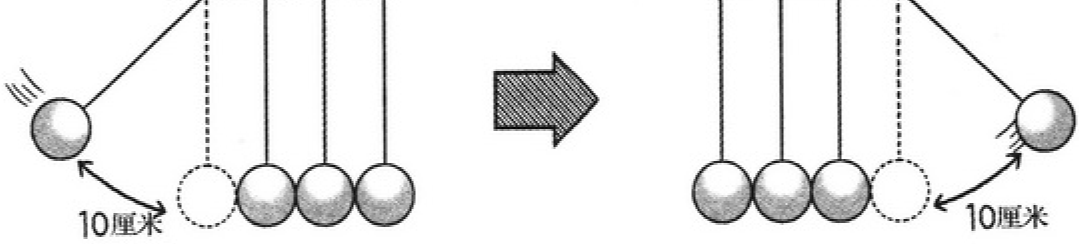


左侧碰撞两个球，右侧将有两个球被弹开。





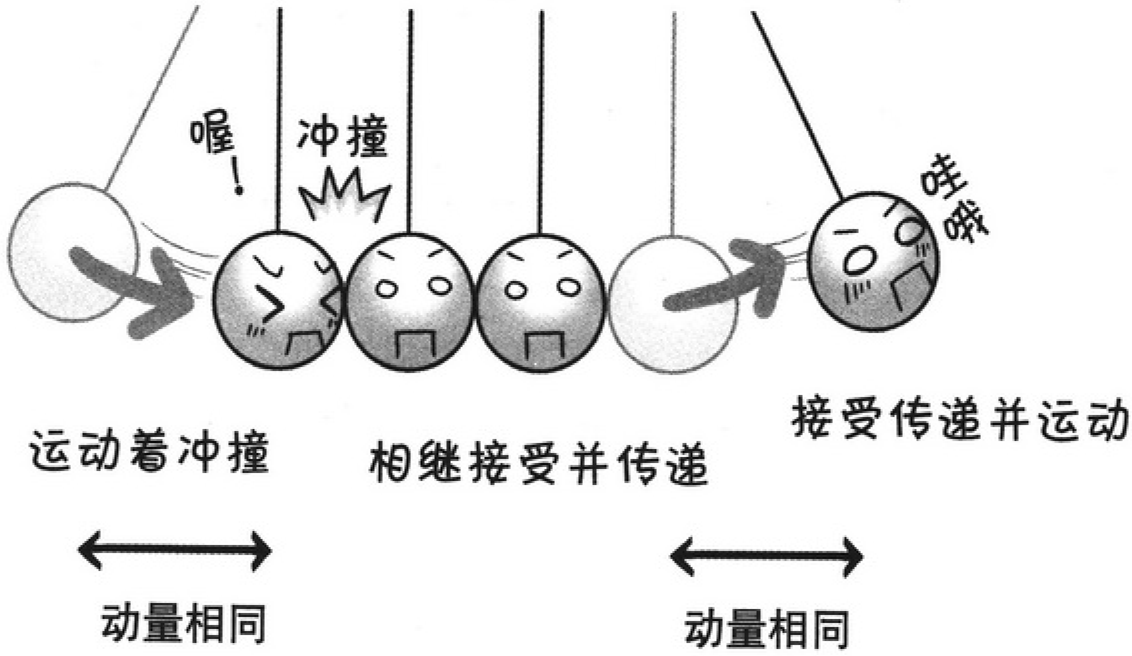
最后也是最有趣的事情是，将左侧的球拨离原来位置 10 厘米……





哇……右侧的球也会飞离原来的位置 10 厘米……

那么，此时我们可以这样来解释每个球的运动。



左侧球碰撞前瞬间的速度 u_1 和质量 m 的乘积，与右侧被弹飞的球的速度 u_2 和质量 m 的乘积相等。
这些球的质量 m 和速度 u 的乘积就是**动量**。

动量能够被等量传递。
这就是著名的“**动量守恒定律**”。

哇!
撞球真有意思啊。

……绘希，你在认真听吗?

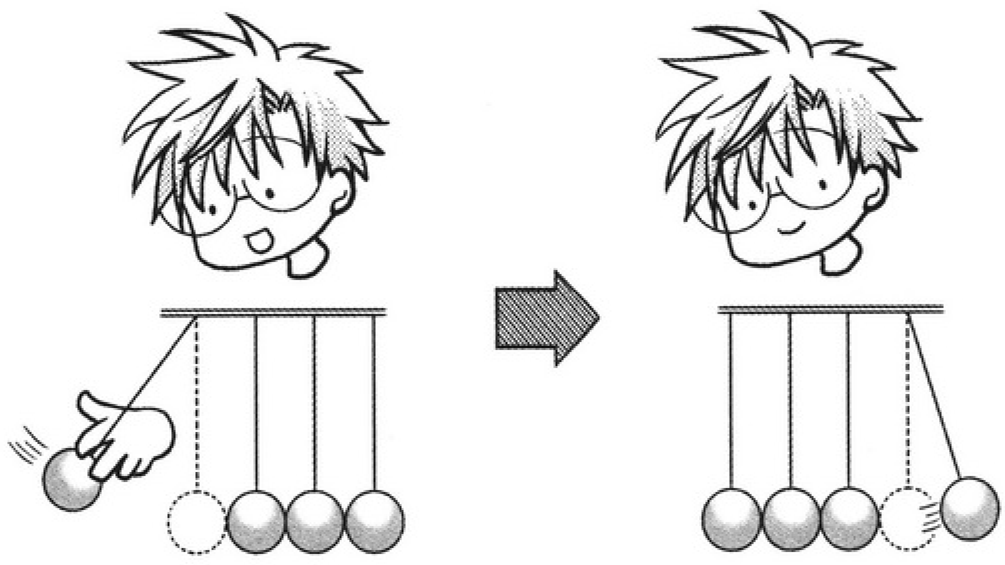
从外部添加的力（冲量）

哎呀哎呀，虽然绘希玩撞球玩得正高兴，不过我还是想打断她一会。

哎！为什么？白石果然居心不良呢……

哈哈哈……我就居心不良一次，在球碰撞的瞬间，用手将球的速度减慢。结果会是怎样呢？

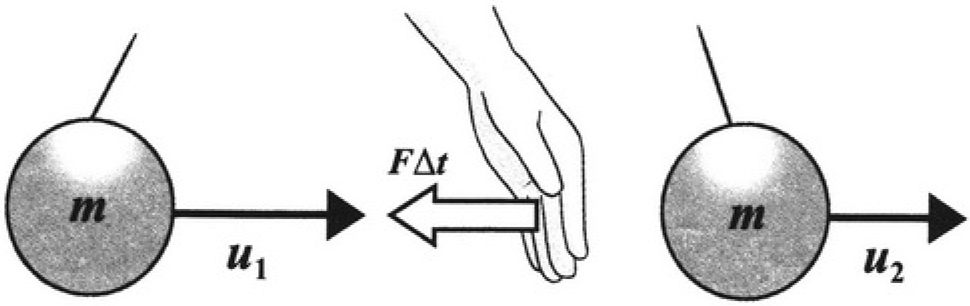
嘭！
右侧被弹飞的球的速度也变慢了，而且弹起的高度也比刚才低。感觉力量变弱了……



这就意味着动量减少了。

接下来，我们从力学的角度对这种现象进行归纳总结。

质量为 m 的球以速度 u_1 在运动的过程中，受到外力 F 在时间 Δt 内的作用后冲撞上其右方的球，右侧被弹飞的球的速度为 u_2。



所谓外力 F，就是白石手上的力。

此时动量的变化情况表示如下：

$$mu_2-mu_1=F\Delta t$$

此处我手上的力 F 和时间 Δt 的乘积就是**冲量**。

也就是说，**变化后的动量 − 变化前的动量 = 外力的冲量**。

啊……我要提问！
变化前的动量大，变化后的动量小，套用这个公式的话，$F\Delta t$ 不就变成负数了嘛！这也可以吗？

是的。我用手故意使坏才使得动量减少，所以 $F\Delta t$ 变成负数也理所当然。



也就是说，添加了一个负数冲量啊。



在这个公式中，只有添加的冲量（手上的力 × 时间）能够表现出动量的变化。
根据这个公式，为了求得力 $\boldsymbol{F}$ 的大小，我们需要两边同除 $\Delta \boldsymbol{t}$。

$$F = \frac{mu_2 - mu_1}{\Delta t}$$



也就是说，**添加的力（手上的力）= 单位时间内动量的变化量**。



根据这个公式，只要知道了我手上的力也就是**外力**的作用时间 Δt，那么，通过测算**变化前和变化后的动量**，就能够求得添加外力的大小。

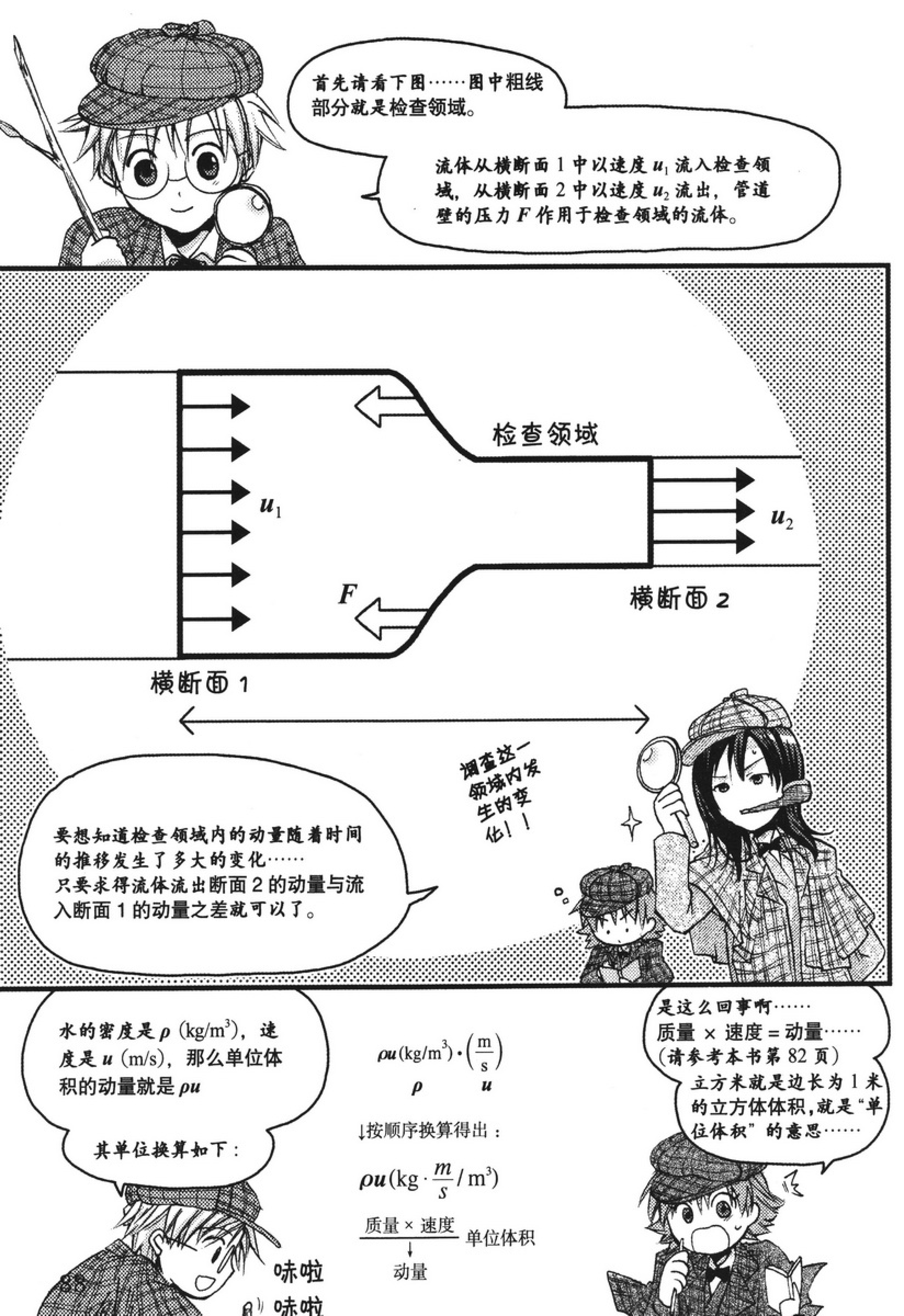


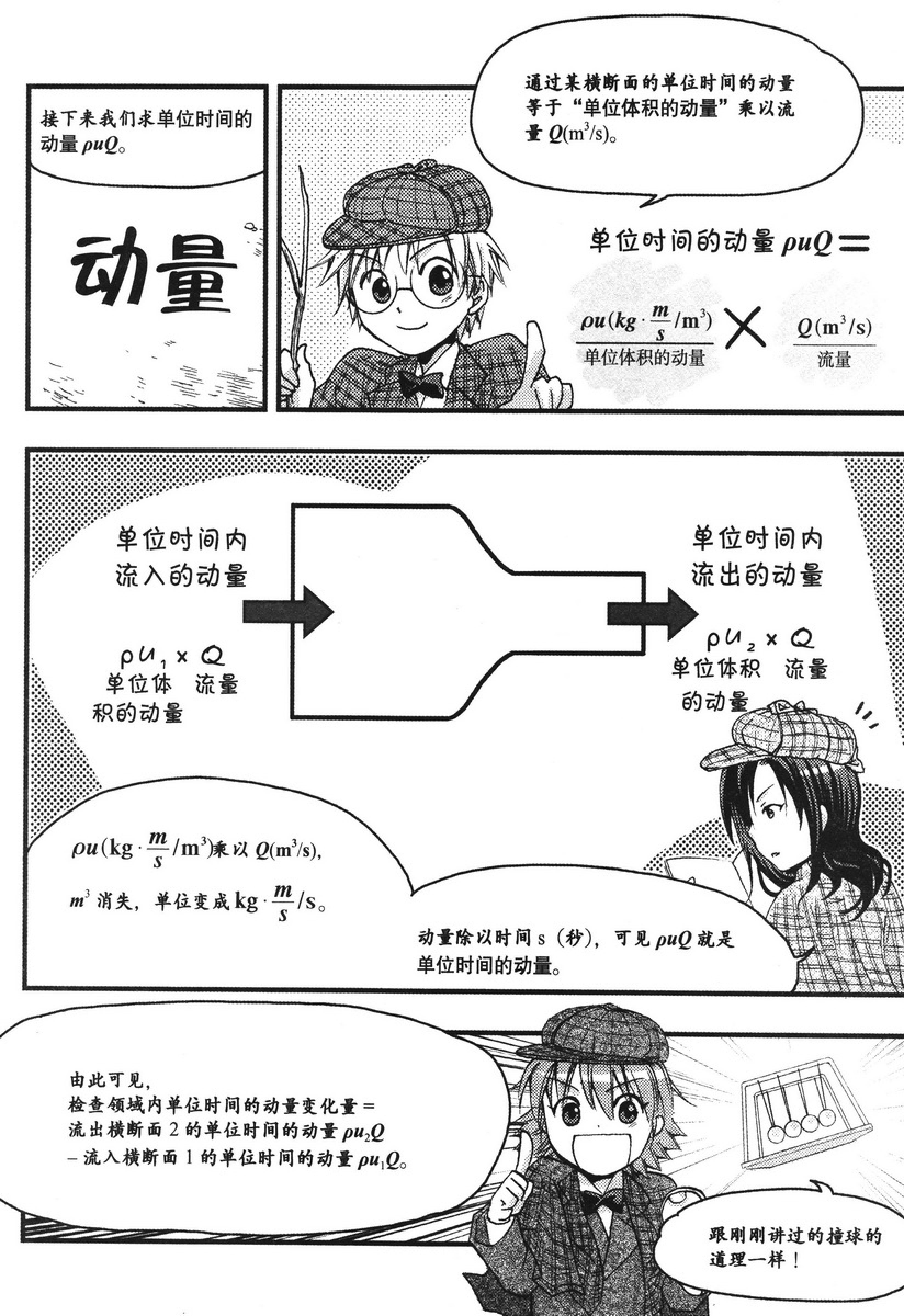
嗯嗯，这就是物体的动量守恒定律。
都听明白了吧！

在秘密房间里……（流体的动量守恒定律）




白石，虽然说是研究，
可我们还是不知道这个检查领域内的流动状况啊……
哇
不是检查领域内部的动量也没关系。
这种情况下，只要分别测算流入检查领域和流出的流体动量就可以了。
通过求得动量的时间变化，就能够得知检查领域内部的动量。
噢
啊！
例如，要想调查一个秘密房间，只要调查进入和离开这个房间的人的情况就可以了！
进
出
IN
OUT
太棒了！
就像侦探似的！
差不多……
嗯……
可是……
咳
好了，请大家想象一下这个水泵管道中突然变细部分的内部情况。
现在开始进入推理时间，我要通过计算和图示，一口气给大家讲清楚……
请大家跟我来……
YES！ SIR！
……


首先请看下图……图中粗线部分就是检查领域。
流体从横断面 1 中以速度 u_1 流入检查领域，从横断面 2 中以速度 u_2 流出，管道壁的压力 F 作用于检查领域的流体。
检查领域
u_1
u_2
F
横断面 2
横断面 1
调查这一领域内发生的变化！！
要想知道检查领域内的动量随着时间的推移发生了多大的变化……
只要求得流体流出断面 2 的动量与流入断面 1 的动量之差就可以了。
水的密度是 ρ (kg/m³)，速度是 u (m/s)，那么单位体积的动量就是 ρu
其单位换算如下：
$\rho u(\text{kg/m}^3)\cdot\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
ρ　u
↓按顺序换算得出：
$\rho u(\text{kg}\cdot\frac{m}{s}/\text{m}^3)$
质量 × 速度 / 单位体积
↓
动量
是这么回事啊……
质量 × 速度 = 动量……
（请参考本书第 82 页）
立方米就是边长为 1 米的立方体体积，就是“单位体积”的意思……
哧啦
哧啦


接下来我们求单位时间的动量ρuQ。
动量
通过某横断面的单位时间的动量等于“单位体积的动量”乘以流量$Q(\mathrm{m}^3/\mathrm{s})$。
单位时间的动量ρuQ =
$\rho u(kg\cdot\frac{m}{s}/\mathrm{m}^3)$ 单位体积的动量 × $Q(\mathrm{m}^3/\mathrm{s})$ 流量
单位时间内流入的动量
$\rho u_1 \times Q$
单位体积的动量 流量
单位时间内流出的动量
$\rho u_2 \times Q$
单位体积的动量 流量
$\rho u(\mathrm{kg}\cdot\frac{m}{s}/\mathrm{m}^3)$乘以$Q(\mathrm{m}^3/\mathrm{s})$，
m^3 消失，单位变成$\mathrm{kg}\cdot\frac{m}{s}/\mathrm{s}$。
动量除以时间s（秒），可见ρuQ就是单位时间的动量。
由此可见，
检查领域内单位时间的动量变化量＝
流出横断面2的单位时间的动量ρu_2Q
－流入横断面1的单位时间的动量ρu_1Q。
跟刚刚讲过的撞球的道理一样！



这种情况下，作用于检查领域中流体的力就是来自管道收缩部分的力 F。
嗯嗯
检查领域
u_1
u_2
F
横断面 2
横断面 1
这个作用力是不是就相当于撞球中“手上的力”F？
综上所述，检查领域内流体的动量守恒定律可用以下公式表示……
好激动
公式是这样的！
$\rho u_2 Q - \rho u_1 Q = F$
$\rho u_2 Q - \rho u_1 Q = F$
由此可见，检查领域内单位时间的动量变化量＝管道收缩部分的作用力。
哇！
太棒了！问题解决啦！


只看方程式感觉好像很难弄明白，但按照顺序一步一步学习的话，就容易多啦。
由此可见，就算再困难的事情，只要慢慢推理，就能够解决掉！
顺便补充一句，这个动量守恒定律在任何一个检查领域都成立，因此选取任何检查领域都没问题。
动量守恒定律真了不起啊……
既可以应用于大坝和河流，又可以应用于管道内部等从外面看不到的地方，大小都可以。
检查领域……
真是太方便了，就像魔法一样呢……
嘀
嘀
好啦，学习时间到此结束。
好像还有点儿空闲时间呐！
时间？
正好可以做乌冬面啊！
来，一起做流水乌冬面吧！
啊，是呢。
哇噢！
乌冬面，乌冬面！


啊
今天大家都累了吧……
嘎……嘎
赶紧睡觉吧……
你们俩个，怎么这种打扮！
阿茜学姐……
浑身血淋淋的幽灵已经来了……
你不想看看吗？
所以今天我们一直不睡觉，还在讲鬼故事……
绘希说，只要讲鬼故事幽灵就会来……
嗒嗦
好怕
哎……阿茜学姐。
阿茜学姐是不是……
怕听鬼故事啊？
啊


……
……
哈……
我最喜欢给怕听鬼故事的人讲鬼故事啦……
今天晚上我们干脆不睡觉了！阿茜学……姐！！
……
啊！
哒哒哒哒哒
啦
啦
啦
绘布这个家伙，说你天真无邪好呢，还是别的什么好呢……
好高兴！

第3章

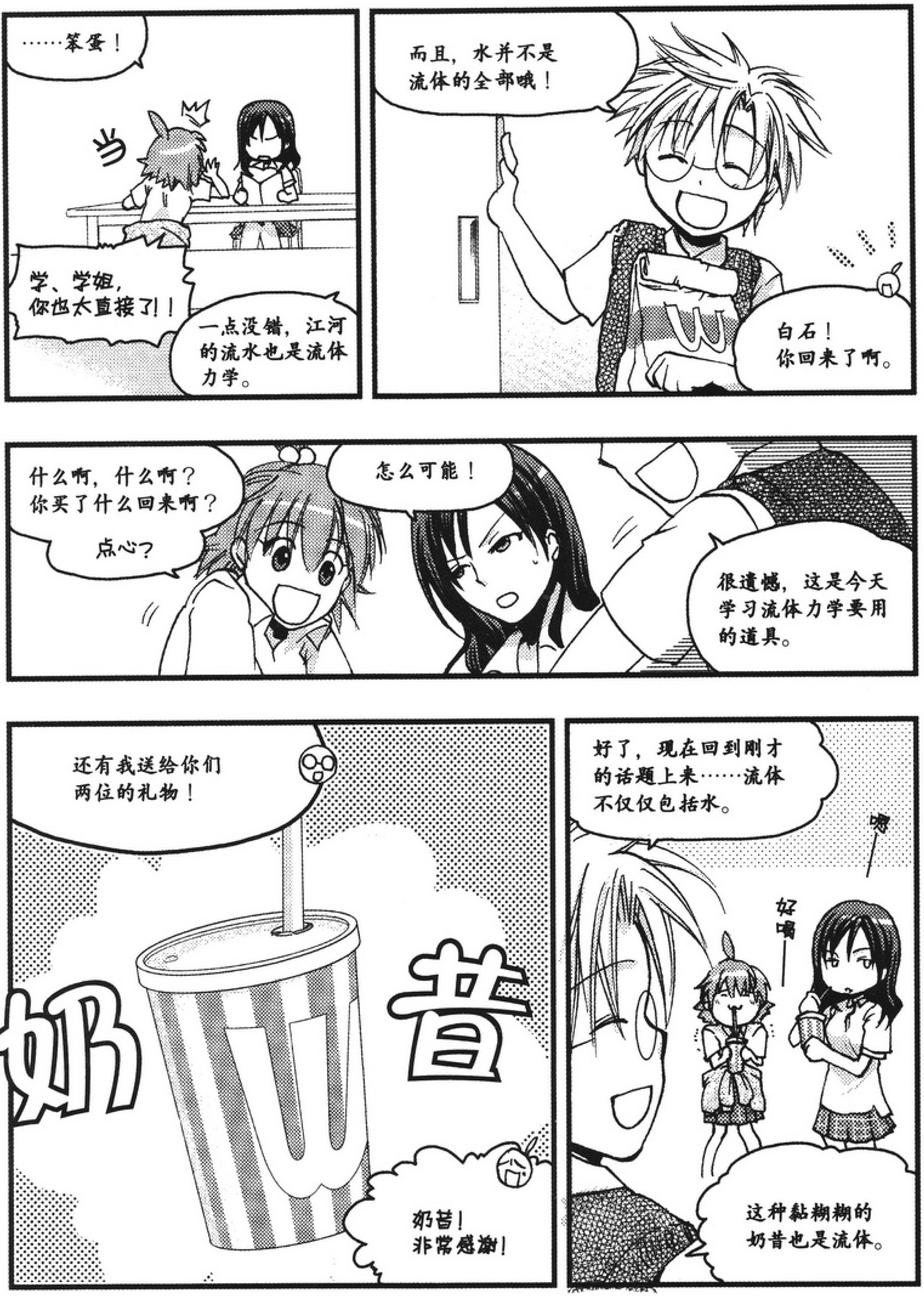
层流与湍流



1. 有黏性的流动



啊……
上次去野营真是太高兴了……
大家再一起去别的什么地方学习流体力学吧……
呵呵 呵呵
那么接下来……
“川流之水不绝”
叮
咣
川流之水？
是流体力学吧，老师！
“但非原本之水”这是不是说没有神秘失踪的事情？
哎！？
什么啊？
……满脑子都是流体力学！
啊哈哈~
所以国语课上好没面子啦！


……笨蛋！
学、学姐，你也太直接了！！
一点没错，江河的流水也是流体力学。
而且，水并不是流体的全部哦！
白石！你回来了啊。
什么啊，什么啊？你买了什么回来啊？
点心？
怎么可能！
很遗憾，这是今天学习流体力学要用的道具。
还有我送给你们两位的礼物！
奶昔
奶昔！非常感谢！
好了，现在回到刚才的话题上来……流体不仅仅包括水。
嗯
好喝
这种黏糊糊的奶昔也是流体。

黏黏糊糊的？清清爽爽的？（黏性）



阻碍流动的讨厌家伙（黏性力）



使其加速、使其减速（黏性力的结构）



接下来我们详细解释黏性力的结构！
请想象一下体育课上马拉松训练的情景。

快跑组和慢跑组正在并排进行跑步训练。
慢跑组的成员绘希混进了快跑组里去了。



这种情况下，快跑组就不得不减速。
因为不减速就要撞上绘希了。





慢慢悠悠跑步的我给大家添麻烦了啊！



好啦好啦，我只是打个比方而已。



接下来的情况正好相反。
快跑组的成员阿茜部长混进慢跑组中去了。

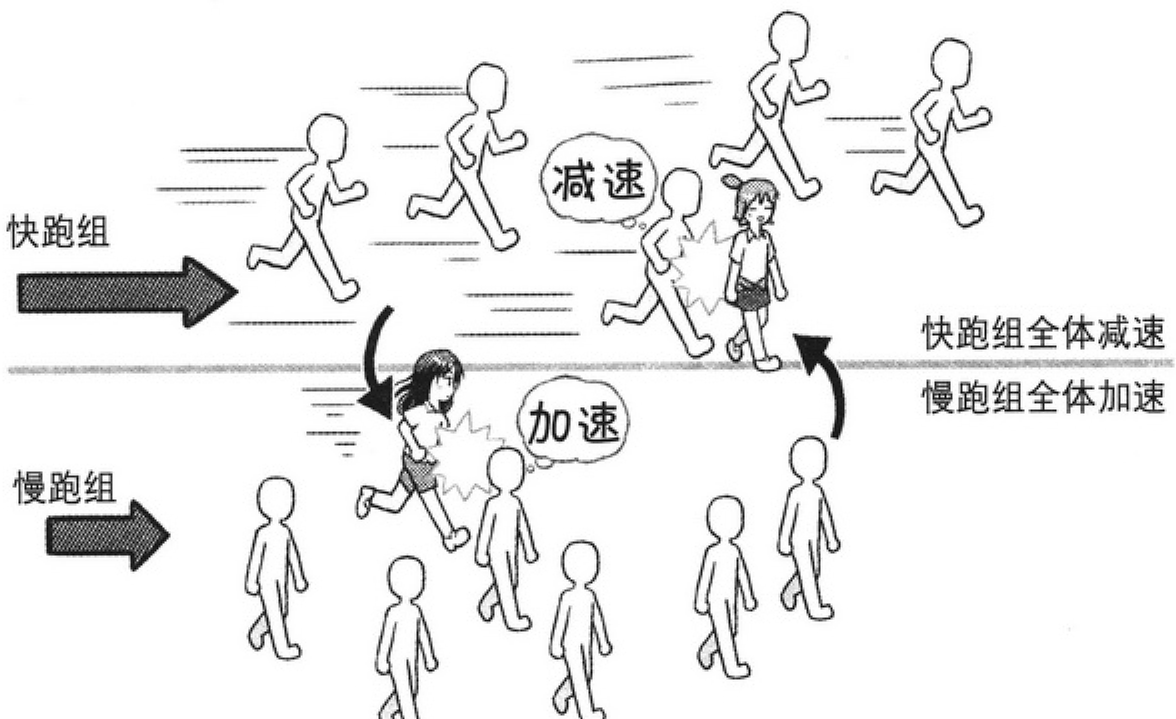
这种情况下，慢跑组就要加速。
因为不加速就要撞上阿茜部长了。



哎呀哎呀，大家都开始快跑了呢。

从动量的角度来说，是慢跑组从快跑的阿茜部长那里得到了更大的动能。也就是说，就像被添加了外力一样。

总结归纳如下图。道路上如果有一辆车跑的很慢，所有车都要减速；如果有一辆车跑的很快，所有车都要加速，这两种情况道理相同。



引自饭田明由、小川隆申、武居昌宏合著的《从基础开始学习流体力学》，第 120 页，图 4.2，OHM 出版社，部分有修改。

嗯……马拉松和汽车的比喻我们已经明白了，这到底说明了什么问题呢？不是要教我们黏性力的结构吗？



啊哈哈。前奏太长了，真对不起。
实际上，这个**使其加速或使其减速的力**正是**“黏性力”**。

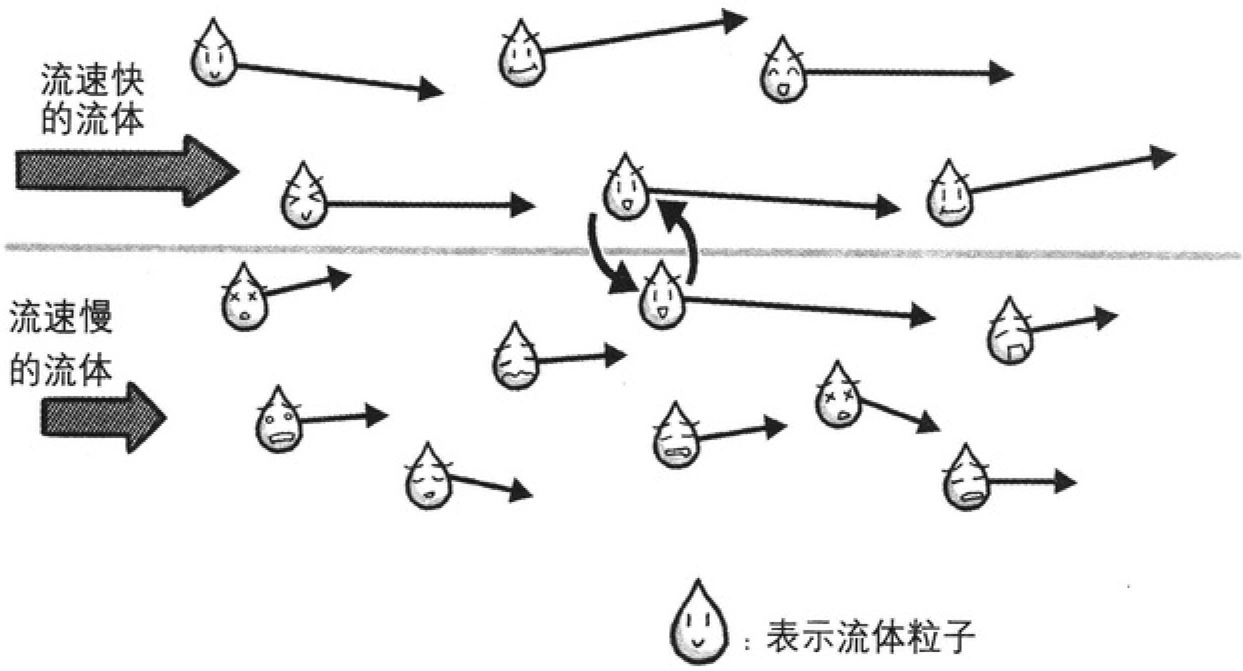


哎？什么意思？
你刚才不是说，黏性力是**起“妨碍流动”作用的力**吗？



是的。虽然有点儿难理解，不过，正是这个使其加速或使其减速的力，才妨碍了流动啊。

接下来我们将刚才马拉松的例子应用到流体中看看。



速度快的流体粒子进入慢速流动的流体中的情况



嗯嗯。感觉就像是速度快的流体粒子和速度慢的流体粒子在并排跑步似的。



速度快的流体粒子进入慢速流动的流体当中了……
就像刚才说过的马拉松训练中的我一样。

接下来考虑流速不同的两种流体合流时的情况。
即使流速并行，由于实际上流体粒子的运动杂乱无章，所以速度快的流体粒子会进入慢速流动的流体中，相反的情况也会发生。

原来如此。这样的话，就像马拉松的例子那样，流速快的流体会减速，流速慢的流体会加速。

如上所述，黏性力在流动速度不同的地方起作用。

这就是黏性力的结构。
是因为流体粒子而产生的力。

嗯。也就是说，**黏性力是发生在流体内部的力**啊。

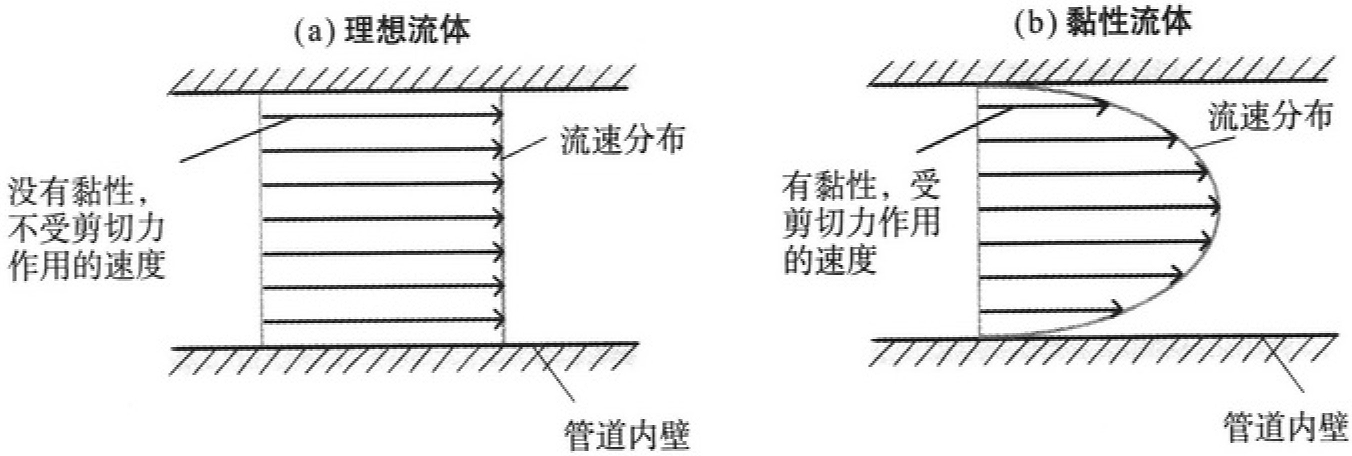
那是空想？（理想流体与黏性流体）



那么……现在我们讲一节非常重要的知识。
那就是“**理想流体**”和“**黏性流体**”。

（● “理想流体”又称作“完全流体”，“黏性流体”又称作“实际流体”。）

请看下图。这是管道内流体的流速分布情况。



● 以后将“黏性引起的剪切力”称之为“黏性力”。

管道内流体的流速分布



实际上，我们身边存在的流体都是“**黏性流体**”，具有**黏性**。
实际存在的流体在流动过程中，其流速分布情况如上图（b）所示。



哦！与管道壁相互摩擦的部分流速最慢，就像被拉着一样，逐渐变慢。



中间流动最快啊。
一点没错，河流的流速情况也是这样的。
两岸流速慢，正中央流速最快。

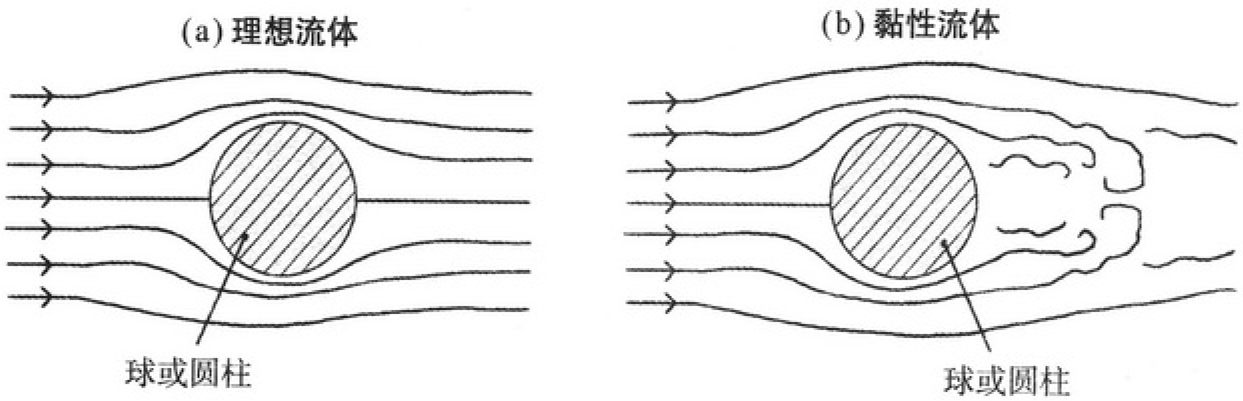
实际上，之前讲过的“伯努利定理”和“动量守恒定律”等都是针对“**理想流体**”而言的。理想流体没有黏性，即使施加外力也不会被压缩。可以称之为“**空想流体**”。

哎？空、空想！怎么会！
那么，之前所讲的……到底是什么啊？

请保持冷静！在理解流体运动的特性、进行模拟计算等情况下，理想流体是必要的。

原来如此……首先借助理想流体来理解流动，然后再综合考虑黏性等各种各样的因素啊。

是的。通过学习黏性，我们可以加深对身边实际流体的理解。另外，流动中产生涡旋也是黏性流体的特征。涡旋的产生是黏性影响的结果。



球或圆柱周围的流动情况

引自久保田浪之介的著作《最简单易懂的流体力学书》日刊工业新闻社（2007）。

将强力粉洒入竹制流水槽中并观察其流动能够发现，实际上是有涡旋产生的。
无论是河流、流水槽水流，还是我们身边的空气，其实都是黏性流体……
“**黏性流体**”才是**实际存在的真实流体**！

什么是速度梯度？（牛顿黏性定律）





请大家回忆一下
我们以竹制流水槽内壁之间的距离为y轴，其中每一个点上的流速为u。
流动的方向
黏性力（越靠近流水槽内壁，黏性力越大）
y
u
竹制流水槽中心
竹制流水槽内壁
内壁上的流速是0m/s，离内壁越远，速度逐渐加快。
从竹制流水槽的中心到内壁之间，阻碍流动的黏性力在起作用，而且越靠近内壁，黏性力就越大。
跟河流的情况一样呢！靠近两岸的地方，水流速度就慢，距离岸边远的地方水流速度就快的让人害怕。
!!
内壁上没有速度，距离内壁越远，速度就越快……是这么回事啊？
将流动流体某一位置的速度u用位置y微分，得到du/dy，这就是……
du/dy
当
“速度梯度”。
用图来表示du和dy的关系，则如右下图所示。
y
u
du
dy
稍微移动dy的距离……速度变化的只有du。
x
竹制流水槽的内壁
微分听起来让人觉得很复杂，其中d表示微小的意思，
跟Δ（Delta）的意思相同，y方向上移动Δy的微小距离时，其速度的变化量用Δu来表示。



还有，流体的黏性力和速度梯度之间有着很深的关系……
YES
绘布，知道这是为什么吗？
!?
为、为什么……为什么呢？
答案就在这个图表当中。
请大家比较一下Ⓐ和Ⓑ两点的速度梯度有什么不同。
Ⓐ和Ⓑ两处 *dy* 的长度相同，*du* 的长度不同，对吧？
Ⓐ点的 *du* 比Ⓑ点的 *du* 要大。
y
u
du
dy
Ⓑ
远离内壁的速度梯度
du
dy
Ⓐ
靠近内壁的速度梯度
x
竹制流水槽的内壁
也就是说，靠近内壁的速度梯度要大。
啊，是这么回事呢。
dy 相同，Ⓐ点的 *du* 却比Ⓑ点的 *du* 大。
速度差越大……也就是说，越是接近内壁，起妨碍作用的力就越大。
y
u
黏性力
黏性力弱
黏性力强
意思是说黏性力变强了？
靠近内壁
存在速度差
速度梯度大
黏性力作用强
原来如此！
说的没错，黏性力和速度梯度之间关系很深呢！
接下来我再补充一些更加严谨的知识……


大家都是"力"家族的成员。
还有个概念叫"黏性应力"，意思是单位面积上 (m²) 的黏性力。
黏性力 (N)
黏性应力 (Pa)
黏性
兄
弟
大家关系好!!
压力 (N)
压强 (Pa)
压力
压强
姐
妹
嗯……跟压力与压强的关系是一样的（请参考本书第 19 页）。
黏性应力一般用希腊字母 τ (Tau) 来表示。单位和压强相同，都是 Pa=N/m²。
黏性力的单位＝N
黏性应力＝τ
单位＝Pa
只是有一点需要特别注意，那就是黏性力的单位是 N。
黏性应力公式表示如下：
τ = μ du/dy
黏性应力
黏度
速度梯度
这个方程式就是牛顿黏性定律。
嗯嗯，看了这个方程式，就明白了黏性应力跟速度梯度成正比的关系呢。
可是，有个符号我还是第一次见到呢！这个 μ 是什么？
μ (miu) 是黏度。
接下来我们要讲的话题就是这个啦！

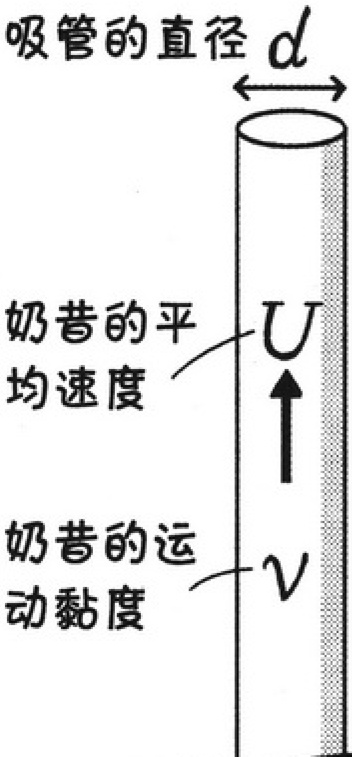
黏糊到什么程度？（黏度与运动黏度）



表示流动特征的定律（雷诺数）







据此来考虑雷诺数的话，那么

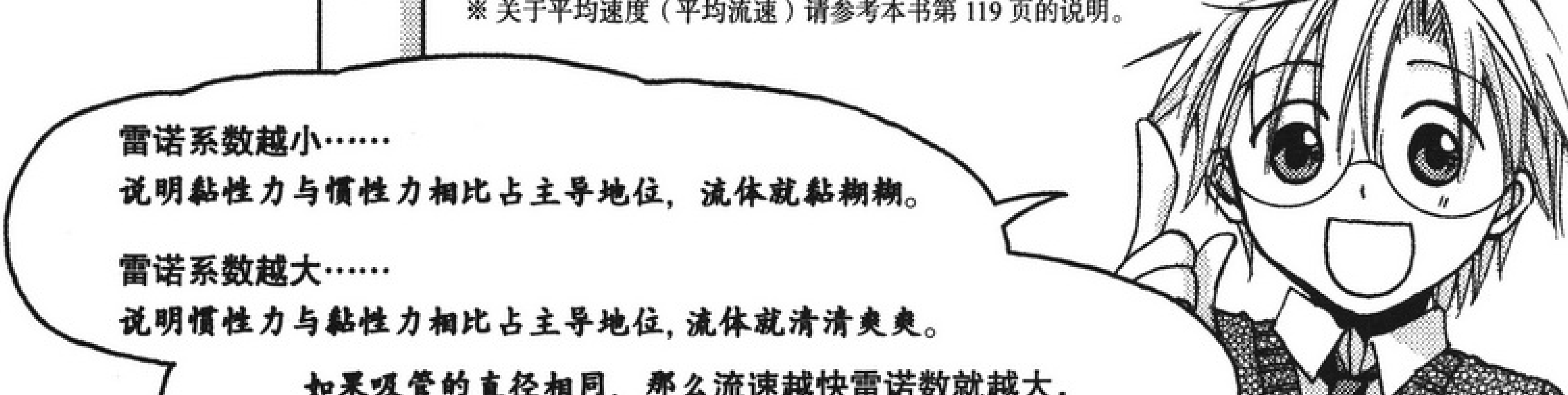
$$\mathrm{Re} = \frac{U \times d}{\nu}$$

$$= \frac{\text{奶昔的平均速度}^{※} \times \text{吸管的直径}}{\text{奶昔的运动黏度}}$$

最后这个方程式可以变形为

$$\mathrm{Re} = \frac{\text{奶昔的惯性力}}{\text{奶昔的黏性力}}$$

※ 关于平均速度（平均流速）请参考本书第 119 页的说明。





2. 层流与湍流



注视烟雾
（层流与湍流）
对了，绘布，这个神秘物品……
我能借来用用吗？
别碰！
绘布
好的！不过，这可是被称作恶魔的薰香哈！
你可要多注意，白石！
怎么看都不过是普通的熏香……
不对……
恶魔
好的。好了，请仔细观察！
……
请注意熏香的烟雾。
刚开始是直着向上的，从半道儿开始就变不规则了。
啊……恶魔来了啊！危险！快停下来！
普通的蚊香也是这样的啦。

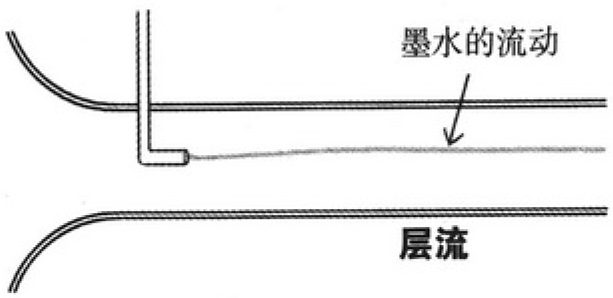


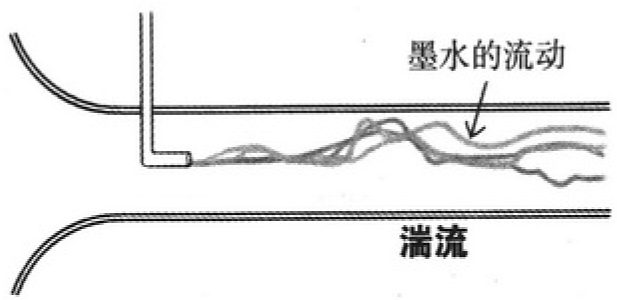
这种由流动的
性质引起的，
湍流
层流
下面这段稳定的部分就是“层流”，
从半道儿开始不规则流动的部分就是“湍流”。
自来水管里水慢慢朝外流动时，水流很规矩。
层流
是不是说……无论是气体还是液体，都有“层流和湍流”之分啊。
总是把这些现象看作是理所当然的事，还从来没有多思考过呢……
当水急速朝外流动时，水流很不规则。
嗯嗯！
的确是这么回事。
湍流
是呢！
部长！
能够发现雷诺数和层流、湍流之间的关系，这才是先人们的伟大之处啊……
它们之间的关系，让我们认真来学习吧！
白石又打开话匣子了……

观察墨水的流动（雷诺数实验）

英国物理学家雷诺发现流体运动在快速流动和慢速流动下差异很大，他将混乱、不规则的流动称之为“湍流”。

雷诺进行了以下实验：将液体注入管道，改变**流速、管道直径大小和黏度**并进行观察。





在流速慢或者液体黏性大的情况下，将墨水注入管道中后，墨水沿着直线方向流动。

但是，流速变快、管道直径增大、或者黏性变小时，管道内流体急剧混合，墨水的流动变得剧烈。

而且，雷诺还发现了层流和湍流的界线是雷诺数 **2320**。这个 2320 被称作“**临界雷诺数**”。

从雷诺的实验中可以看出，如果流体惯性力和黏性力的比值超过一定数值，流动状态就会改变。

变得不规则了（湍流的特征）



湍流的特征

三维流动	喝醉了酒、东倒西歪的样子……
非定常流	喝醉酒了，一下跑步前进，一下停下来的样子……
内部流体剧烈混合	喝醉了酒缠着别人……
因管壁附近的速度梯度变大，所以管壁的粘性应切力变大	喝醉了酒撞到墙上，受到反作用力……
随着流量的增加，压强损失* 增大	喝醉了酒跑步，累的哼哧哼哧（因为能量损失过大）

※ 压强损失 = 某两点间的能量损失。详细内容请参考本书第 134 页。

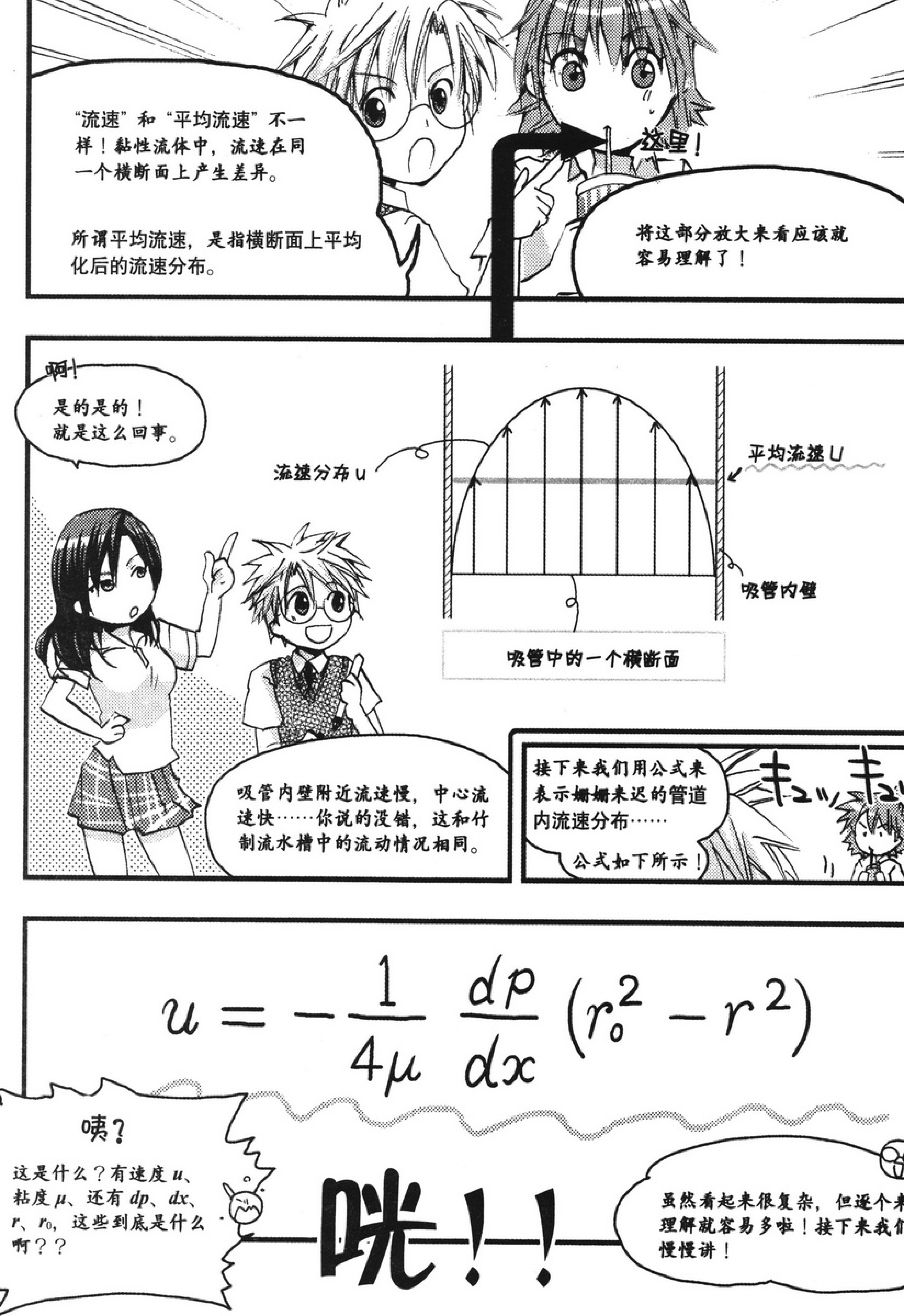


3. 管道内的层流

吸管中的流动（平均流速与流速分布）




首先是排在第一位的“流速”。
流速
还是在中途消失了呢？
绘布在喝奶昔的时候，从吸管下方吸入的奶昔一定会流入嘴里？
○×□△☆（不会消失啊），
○×□△☆（难道是神秘失踪？）
干嘛！多管闲事！
!?
是连续性方程啊！（参照本书第66～67页）。
没错！
好啦绘布，你继续喝吧！
无论是有黏性的“黏性流体”，还是没有黏性的“理想流体”，根据连续性方程，吸管内流体的流动无论在哪个横断面上，其平均流速 U 都是一定的。
（“粘性流体”、“理想流体”请参照本书第104页。）
U
U
U
无论在哪个横断面上，其平均流速 U 都是恒定的！
平均流速？哪个横断面上都一样……之前讲过的竹制流水槽的速度可是不一样的啊？
（请参考本书第107页等）
黏性切应力……速度梯度……
?
还真是有点复杂呢！
实际上这正是需要注意的地方！



“流速”和“平均流速”不一样！黏性流体中，流速在同一个横断面上产生差异。
所谓平均流速，是指横断面上平均化后的流速分布。
这里！
将这部分放大来看应该就容易理解了！
啊！
是的是的！
就是这么回事。
流速分布 u
平均流速 U
吸管内壁
吸管中的一个横断面
吸管内壁附近流速慢，中心流速快……你说的没错，这和竹制流水槽中的流动情况相同。
接下来我们用公式来表示姗姗来迟的管道内流速分布……
公式如下所示！
$$u = -\frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dx}\left(r_0^2 - r^2\right)$$
咦？
这是什么？有速度 u、粘度 μ、还有 dp、dx、r、r_0，这些到底是什么啊？？
咣！！
虽然看起来很复杂，但逐个来理解就容易多啦！接下来我们慢慢讲！

认真观察方程式（呈抛物线分布的流动）

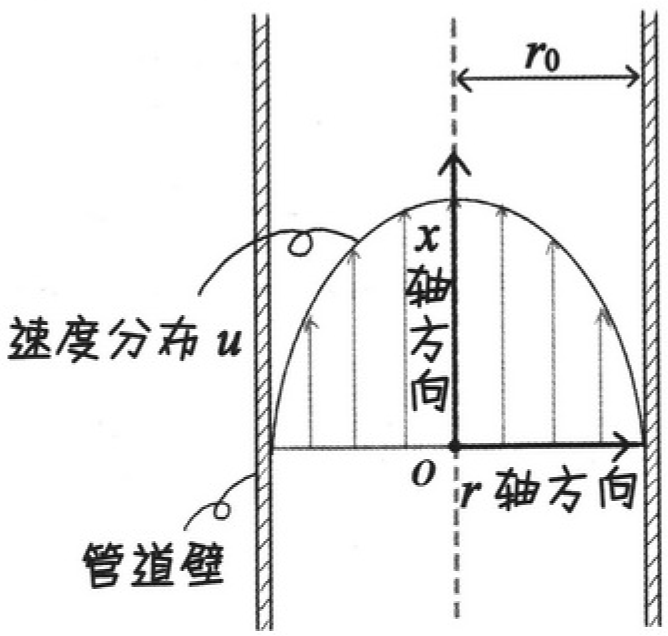
$$u=-\frac{1}{4\mu}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\chi}(r_0^2-r^2)$$

首先注意到的是 ***dp/dx*** 这部分。***du/dy*** 跟速度梯度相似……
可是为什么前面要加上负号呢？嗯……

阿茜部长，你可真尖锐。这个就是“**压强梯度**”。
d 和 Δ 表示微小的意思，*x* 轴方向移动微小距离 ***dx***(m) 时，压强的下降值仅为 ***dp***(Pa)，这种**因位置变化而引起的压强变化量**就是压强梯度 . 因为 ***dp/dx*** 的值是负数，所以在公式前加上负号，以保证整体的值为正。

原来如此。

那么接下来我们说明一下 r 和 r_0。请想象一下管道内的情形。



以中心为基准，以流向为 *x* 轴方向。
r 为中心 O 到管道壁方向的轴，r_0 是管道的半径。



嗯嗯。

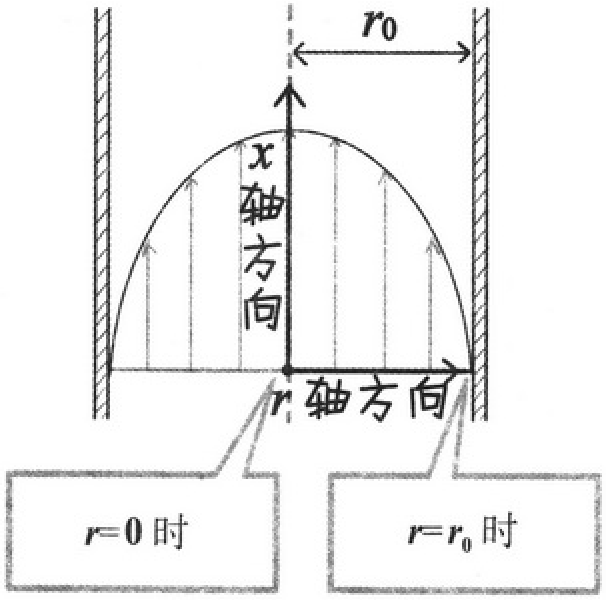


r=0 时，就是在吸管中心。

此时 x 轴方向的速度最大。也就是说，流速最快。

r=r_0 时，流动紧贴管道壁。

此时，x 轴方向没有速度，即没有流速。





嗯嗯，看图就明白了呢！



……我明白了。也就是说，这个公式是 r 的二次函数。

表示的就是中央的那个曲线——抛物线啊。



就是这么回事！这个公式体现了管道内的流速呈以**管道中心为最大值的抛物线分布**。

另外，这种呈抛物线分布的流动称之为“**泊肃叶流**”。

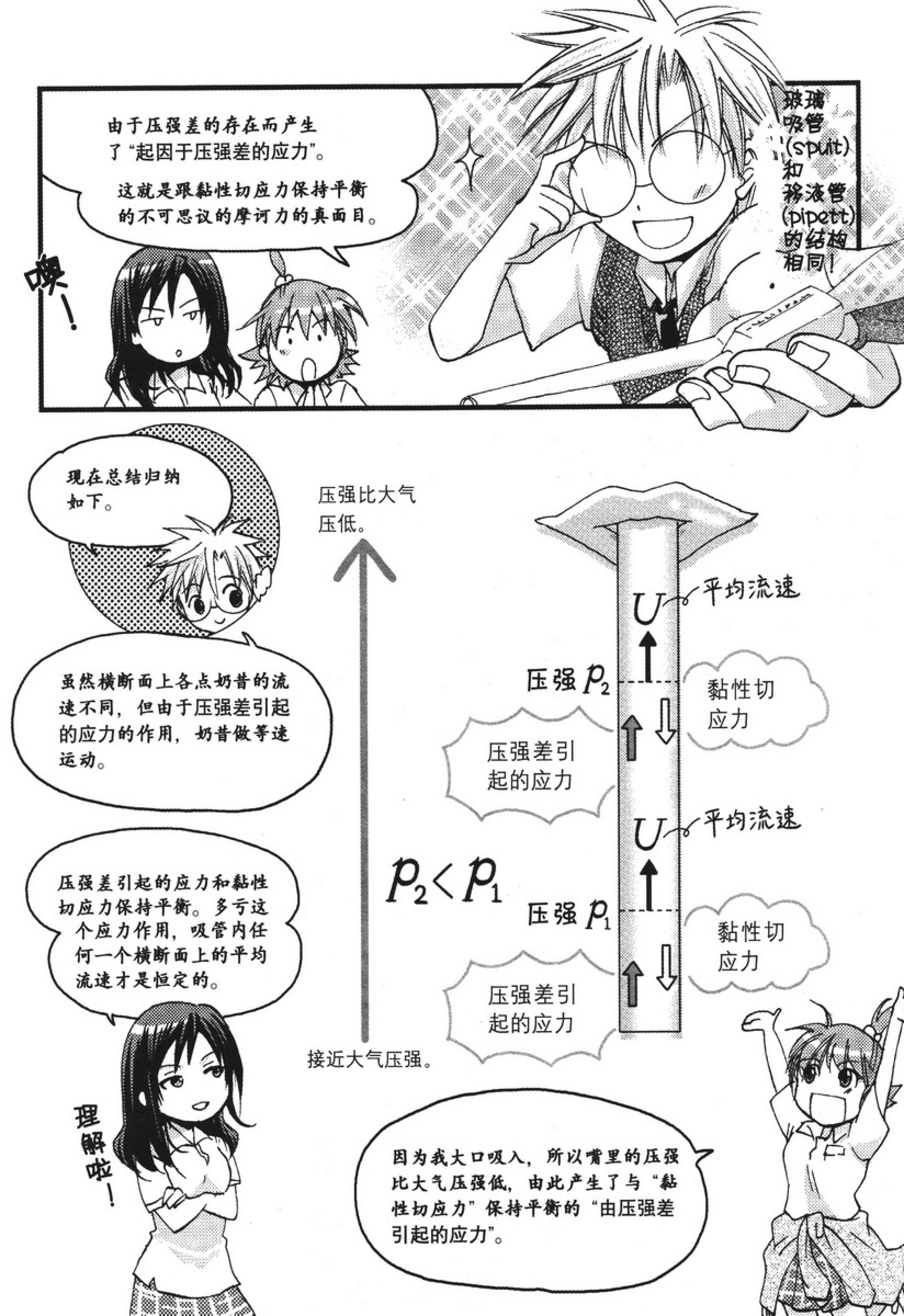
不可思议的摩诃力的真面目是什么？（压强差）




首先，为了明确起见，我们先确认流动的“上流”和“下流”的位置。
下流
流动的方向
上流
绘希喝的奶昔从杯子往嘴里移动，所以流向如图所示。
嗯嗯
也就是说，靠近嘴边的是下流，远离嘴边的是上流啊。
那么，
阿茜学姐的问题可以用下图来表示。
下流处（靠近嘴巴的地方）的流速分布u.
黏性剪应力
上流处（远离嘴巴的地方）的流速分布u.
吸管壁
如下图所示，吸管横断面上的流速分布都相同，而且无论什么地方平均流速也都相同。
平均流速
下流处
平均流速
上流处
吸管壁
是的是的！就像这样，确实应该越流越慢。
原来是因为这个家伙！
关于这一点，请不要担心，部长。
因为绘希在喝奶昔的时候，流动方向上的平均流速是不会变慢的！
什么？为什么呢？



这是因为还有一个不可思议的摩讶力存在，它正好和黏性切应力保持平衡，使流体等速运动……
这个力就在嘴里！
在这里？
绘希，你大口吸！
现在绘希嘴里的压强变低了。
因为用吸管吸，就意味着嘴里的压强低于大气压……
吸
是的啊！
那么我们比较一下吸管上流处（远离嘴巴的地方）和下流处（靠近嘴巴的地方）的压强大小。
跟上流处的压强 p_1 相比，下流处的压强 p_2 要低。
下流处
p_2
U
压强低
p_1
U
上流处
压强高
是啊！以前在学习压强的时候就学过压强差 Δp 这个概念了！
（请参考本书第 33 页）
由于压强差 Δp 的缘故，奶昔才会流到绘希的嘴里啊！
上流处（远离嘴巴的地方）接近大气压强，下流处（靠近嘴巴的地方）越靠近嘴巴，压强越低。
因此，奶昔会从压强高的上流处流向压强低的下流处。



由于压强差的存在而产生了“起因于压强差的应力”。
这就是跟黏性切应力保持平衡的不可思议的摩诃力的真面目。
玻璃吸管(spuit)和移液管(pipett)的结构相同!
噢—!
现在总结归纳如下。
压强比大气压低。
U 平均流速
压强 p_2
黏性切应力
压强差引起的应力
U 平均流速
$p_2 < p_1$
压强 p_1
黏性切应力
压强差引起的应力
接近大气压强。
虽然横断面上各点奶昔的流速不同,但由于压强差引起的应力的作用,奶昔做等速运动。
压强差引起的应力和黏性切应力保持平衡。多亏这个应力作用,吸管内任何一个横断面上的平均流速才是恒定的。
理解啦!
因为我大口吸入,所以嘴里的压强比大气压强低,由此产生了与“黏性切应力”保持平衡的“由压强差引起的应力”。

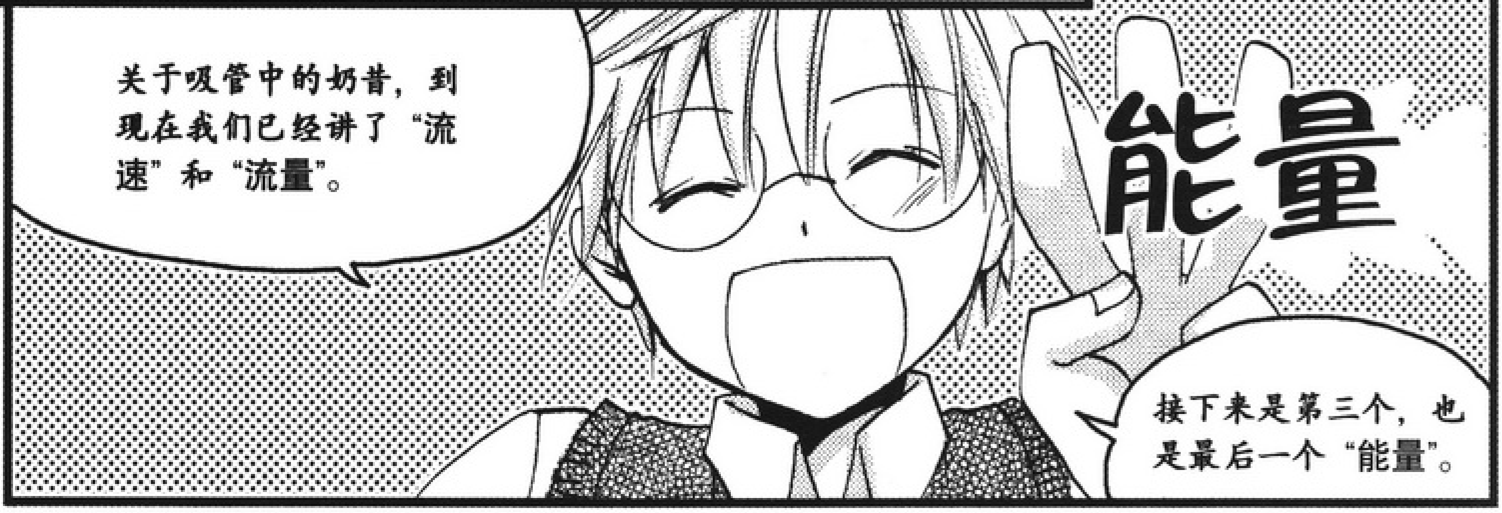
我想多喝点（黏度与流量的关系）



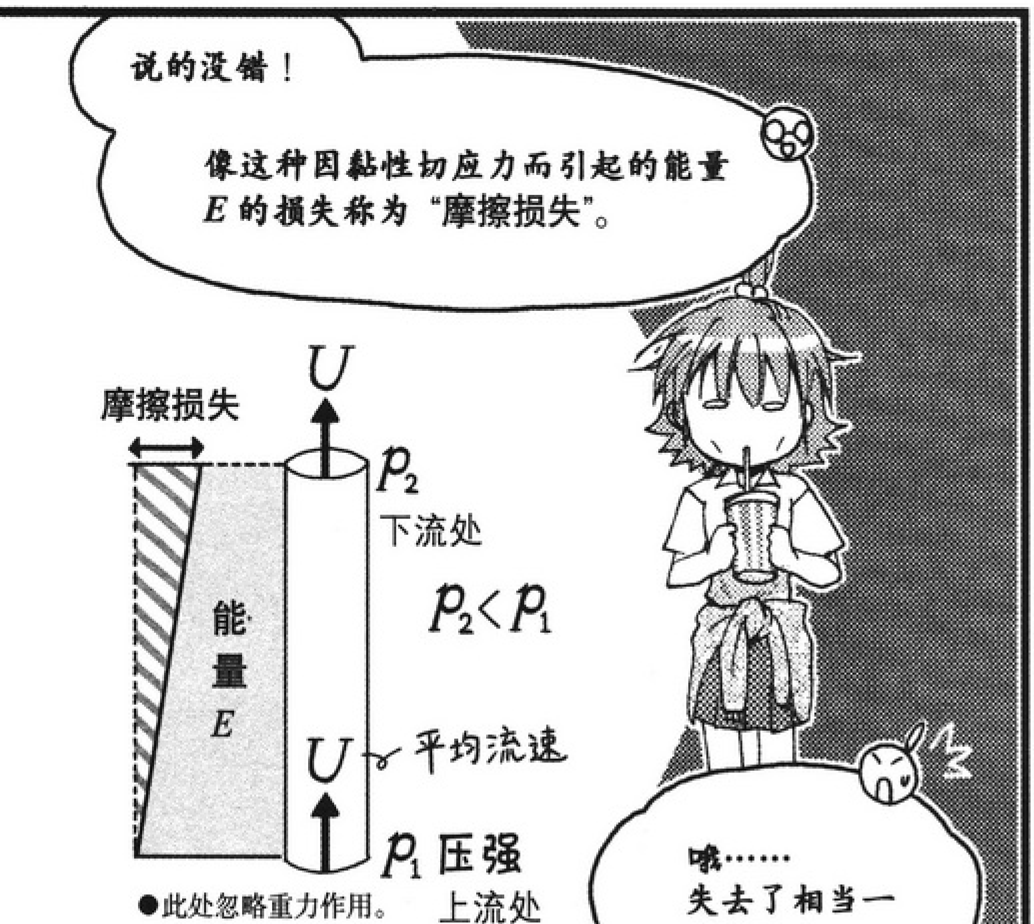


一秒钟内吸入奶昔的量用 $Q(m^3/s)$ 表示，吸管的半径用 r_0 表示，请看下面的公式！
虽然看起来非常复杂，但请大家认真观察观察！
$$Q=\frac{\pi r_0^4}{8\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)$$
下流处
r_0
p_2 此横断面处压强
x轴方向
dx
p_1 此横断面处压强
吸管壁
上流处
π 为圆周率，等于 3.14，r_0 为吸管半径，μ 为奶昔黏度，dp/dx 为压强梯度。
压强梯度指的是在 x 轴方向上移动微小距离 dx 时所引起的压强变化量。
我好像弄明白了呢！
这个公式表示的是 1 秒钟内能够喝到的奶昔量。
好棒
流体黏度高的话，黏度 μ 大，所以流量 Q 就变小。因为奶昔黏度很高，所以喝不到太多，这一点从这个公式也能看明白。
只是，有点遗憾啊……
这个表示流量关系的公式仅限于喝奶昔等的情况。
湍流的情况会更加复杂。
嗯……

能顺利喝到奶昔吗？（管流伯努利方程式）







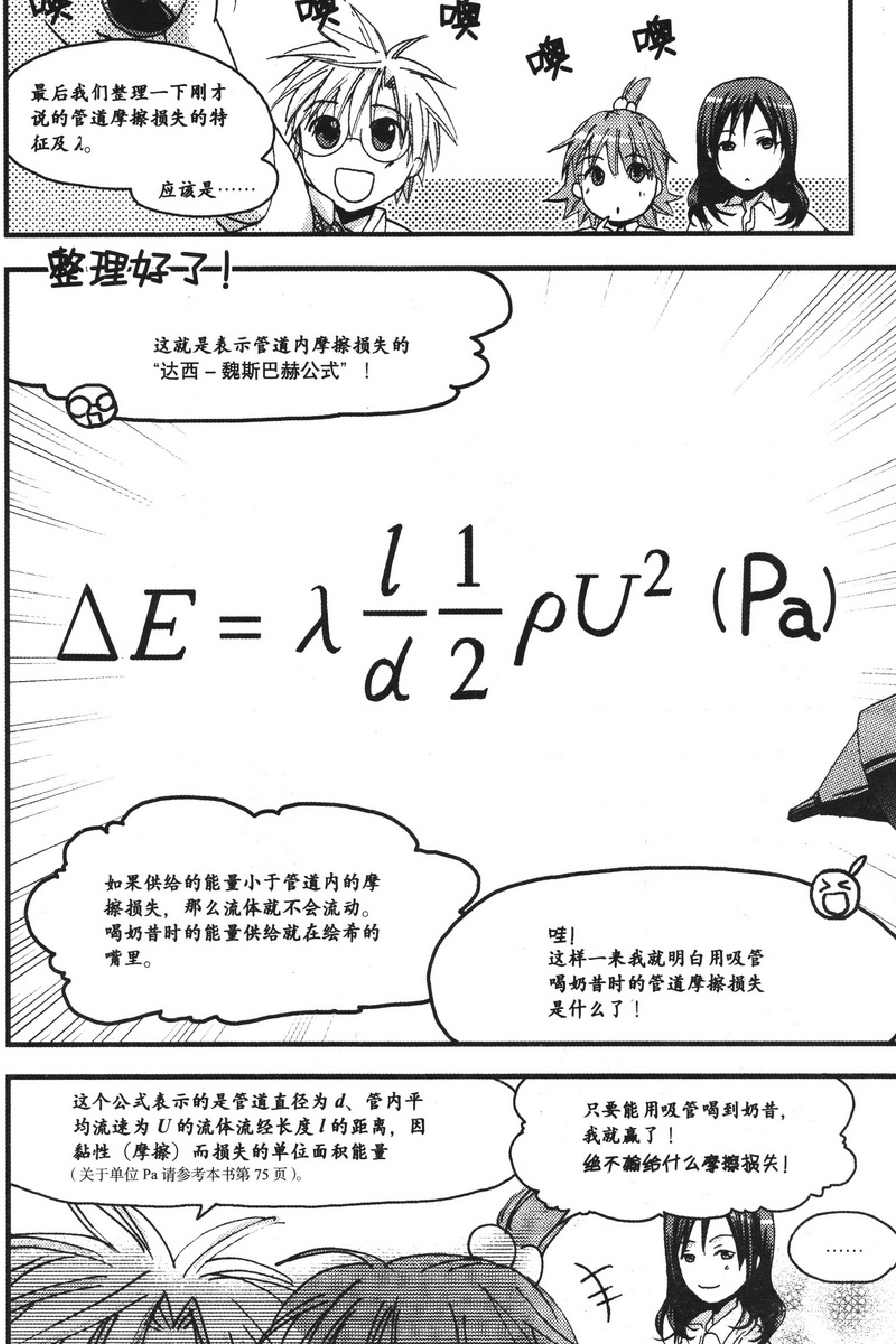




你不用特意这么说我也知道你心地不良，学姐！
那么，让我们考虑一下流体流动中会损失多少能量吧。
（请参考本书第72页）
如果是没有黏性的理想流体，根据伯努利定理，
流体的能量沿着流线恒定不变。
但是！在此很遗憾的通知大家。
黏性流体中由于黏性切应力的作用，能量会损失掉……
伯努利方程中所表示的能量 E 越靠近下流损失越大！
当！
此时，管道内某横断面上的伯努利方程应该改写如下。
这就是所谓的“管流伯努利方程”！
看！
$\frac{1}{2}\rho u^2 + p + \rho g z = E(s)$ (Pa)
和理想流体不同，黏性流体中方程式右边的能量 E 不是定数，而是随着流线 s 不断变化。
所以 E 是 s 的函数，这个意思用 $E(s)$ 来表示。
$E(s)$
哦！能量增加了！
嗯嗯……说的没错，下流处（吸管上方）与上流处（吸管下方）的能量大小的确不一样。



绘布，听明白了哈！
根据图示，相距 l 的两个横断面之间，其损失的能量只有 ΔE。
流线 s 轴
（×轴）
ΔE
d
U
l
E
而且这个管道摩擦损失 ΔE 具有以下特征……
与管道长度 l 成正比。
与平均流速 U 的 2 次方成正比。
与管道直径 d 成正比。
……怎么样？绘布。
嗯嗯嗯
用非常非常细、非常非常长的吸管，非常非常想一口气喝干的话，那么管道摩擦损失 ΔE 就会变得非常非常大，所以就喝不到奶昔！是不是这个意思？
咚！
嗯，说的没错！
管道摩擦损失 ΔE 与管道长度 l、平均流速 U、管道直径 d 之间的关系称为管道摩擦系数，用 λ(lambda) 来表示。
管道摩擦系数 λ 是一个比例定数，在层流的情况下 $\lambda = \frac{64}{RE}$。



噢 噢 噢 噢 噢
最后我们整理一下刚才说的管道摩擦损失的特征及λ。
应该是……
整理好了！
这就是表示管道内摩擦损失的“达西－魏斯巴赫公式”！
$\Delta E = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho U^2$ (Pa)
如果供给的能量小于管道内的摩擦损失，那么流体就不会流动。喝奶昔时的能量供给就在绘布的嘴里。
哇！这样一来我就明白用吸管喝奶昔时的管道摩擦损失是什么了！
这个公式表示的是管道直径为 d、管内平均流速为 U 的流体流经长度 l 的距离，因黏性（摩擦）而损失的单位面积能量（关于单位 Pa 请参考本书第 75 页）。
只要能用吸管喝到奶昔，我就赢了！绝不输给什么摩擦损失！
……


学习可真有意思啊……
今天也好好学习啦……
懒腰
我打算再用一天时间结束这门课程。
好啊好啊！加油啊！
绘希现在已经很像物理研究部成员了呢……
也到了我退出研究部的时候了。
……部长，你怎么了？
阿茜学姐？
没什么……


这两个人是怎么了？
那个，没什么的……
部长要引退了，这个问题我还没有想过呢……还真吃惊不小啊。
说什么呢！
3年级的夏天？其实有个部，我刚参加就退出了。
通过这一周的学习，我提高了不少。
……我们是不可能一直呆在一起的嘛。
“川流之水不绝”！
记住哦绘布，
考试会考到的哦。
再见。
路上小心！
……我们也回家吧，绘布。
绘布……

补充说明



～软管的压强损失～



软塌塌的吸管能做成不同的形状，同样，管道也不仅有直的。

管道的入口附近、弯曲的部分、以及横断面积突然增大或者突然缩小的部分，都会产生**流体能量损失**，这种能量损失称为“**压强损失**”。

像这种管道摩擦损失以外的压强损失用 ΔP 来表示，其计算公式如下：

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho U^2}{2}$$

公式中 $\boldsymbol{\rho}$ 是流体密度，$\boldsymbol{U}$ 是管道内流体的平均速度。

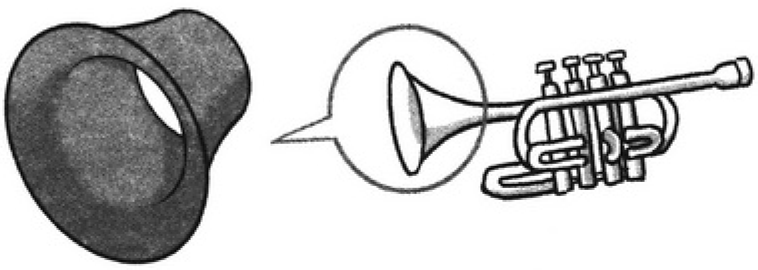
公式中的 ζ（zeta）称为“**损失系数**”，这是一个定数，因管道形状的不同而不同。损失系数指的是占流体动能 $\rho U^2/2$ 的比例。

接下来我们针对不同形状的管道来说明其具体的损失系数。

● 入口损失

我们使用管道从广阔的空间汲取流体的时候，管道入口周围的流体就会改变流向朝管道的方向流动，此时管道入口部分就会产生能量损失。

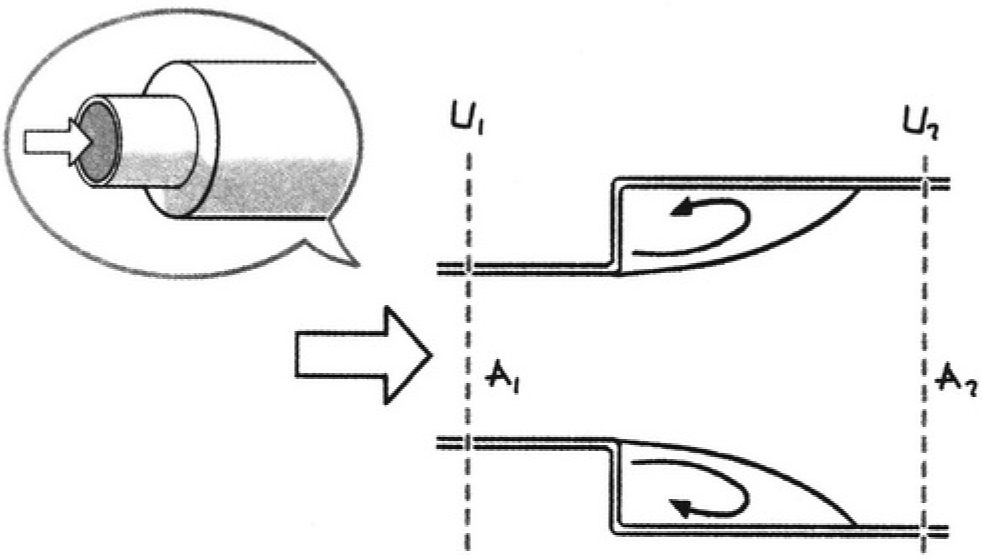
入口损失因入口大小的不同而有很大差异。



喇叭形状的入口能够减少**入口损失**。它的损失系数 ζ 差不多是 0.006。

● 急剧扩大管道

横断面积急剧扩大的管道，因为流动面积急剧变宽，扩大的部分会产生涡旋，因而导致很大的损失。

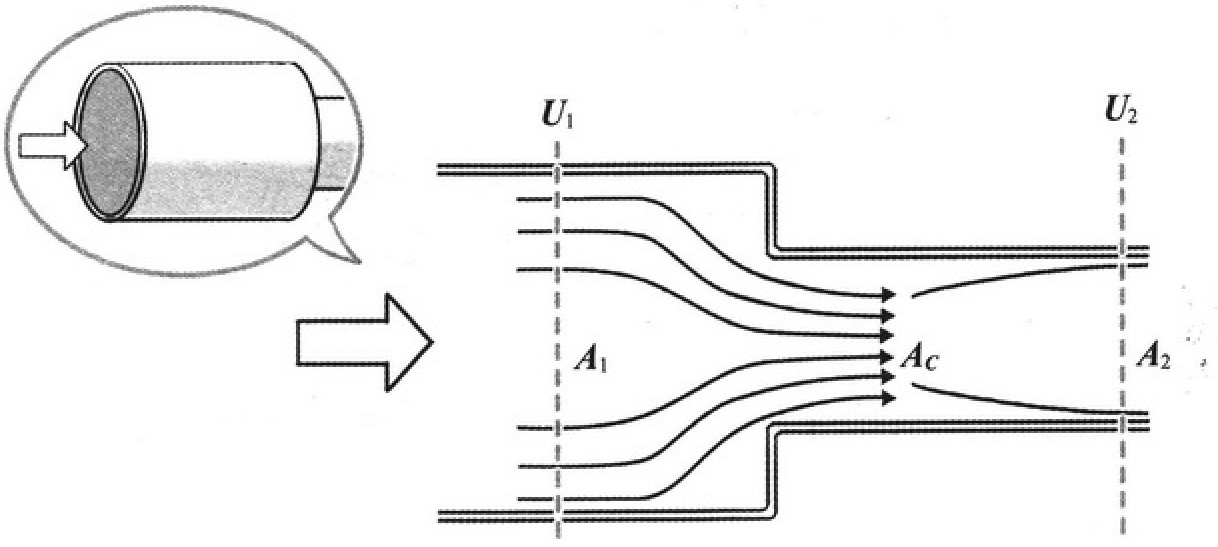


入口处的横断面积用 A_1 来表示，速度用 U_1 来表示，扩大部分的横断面积用 A_2 来表示，距离扩大部分较远处的速度用 U_2 来表示，那么因横断面积的变化而引起的损失系数的计算公式如下：

$$\zeta = \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\right)^2$$

● 急剧缩小管道

横断面积急剧缩小的管道中，流体面积缩小，与下流的横断面积 A_2 相比，缩小部分的横断面积还要小。



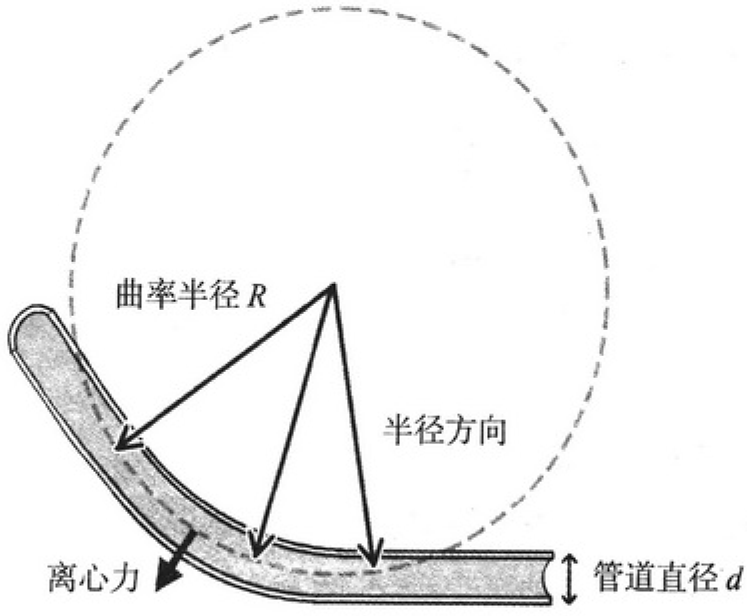
如果用 A_C 来表示缩小部分的横断面积，将此处的流动系数定为 $C_C = A_C/A_2$，那么急剧缩小管道的损失系数 ζ 的计算公式如下：

$$\zeta = \left(\left(\frac{1}{C_C}\right) - 1\right)^2$$

对于急剧缩小管道，一般将下流的平均速度 U_2 定为其代表速度。

● 弯曲管道

弯曲管道根据曲率可以分为曲管和弯头管两种，其中曲率大的管道被称为**弯头管**。因弯曲管道内侧的流体被挤压向半径方向，所以管道内会产生涡旋。



我们用 ***d*** 来表示管道的直径，用 θ（°）表示弯曲度，用 ***R*** 来表示曲率半径，那么曲管的损失系数的计算公式如下：

$$\zeta = \left\{0.131 + 1.847\left(\frac{d}{2R}\right)^{3.5}\right\}\frac{\theta}{90} \quad (0.5 < R/r < 2.5)$$

～浴池里的剩洗澡水，阿拉伯海的石油～

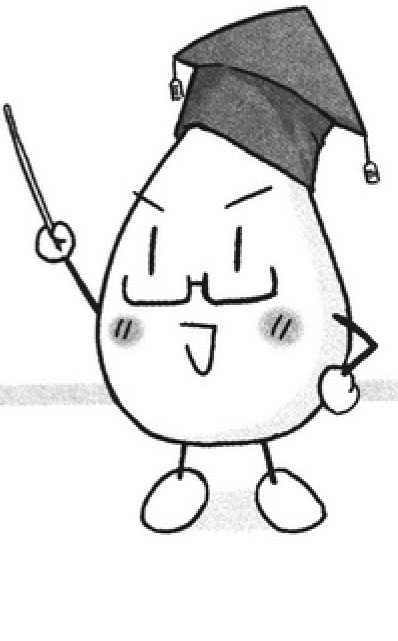
这次学习中我们都是拿身边的事物举例子。
例如第三章中的奶昔、吸管、绘希的嘴巴等等。

接下来我们拿工业产品打比喻。
将奶昔替换成石油（原油），吸管替换成输油管，嘴巴替换成抽水泵。

那么，提问个问题。
抽水泵能够将浴池里的剩洗澡水抽送到洗衣机里，却不能抽送阿拉伯海的石油。这是为什么呢?

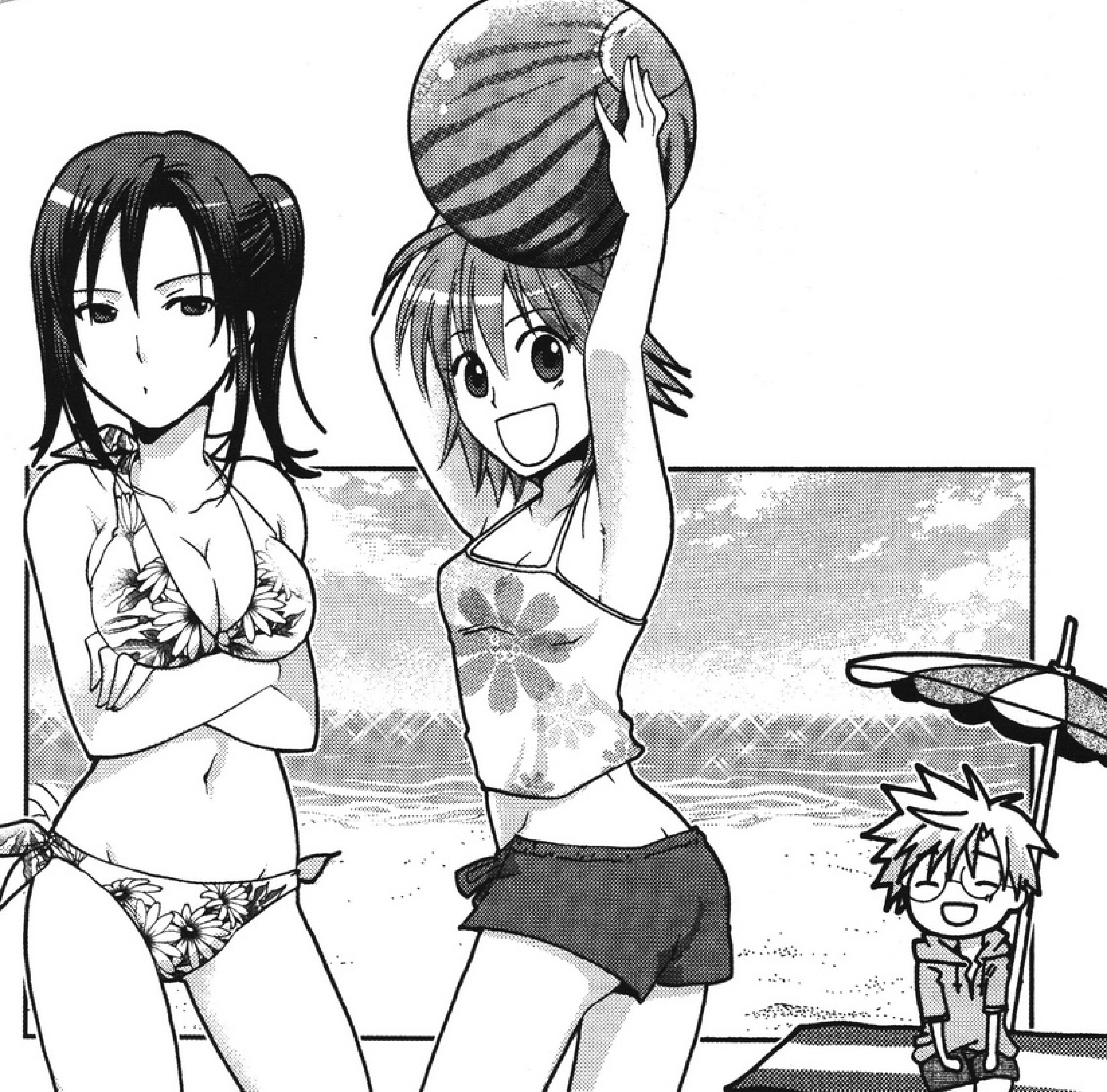
我们已经学习了黏性，答案就很明显了。
因为石油黏度大，根据牛顿黏性定律，其黏性切应力就大。
从而导致管道内的摩擦增大，所以抽水泵就没法抽送石油。

像这些实际当中使用的抽水泵、工业产品等，都是根据其不同用途，考虑到流体的黏度而设计的。



第 4 章

阻力与升力



1. 作用于物体的阻力与升力

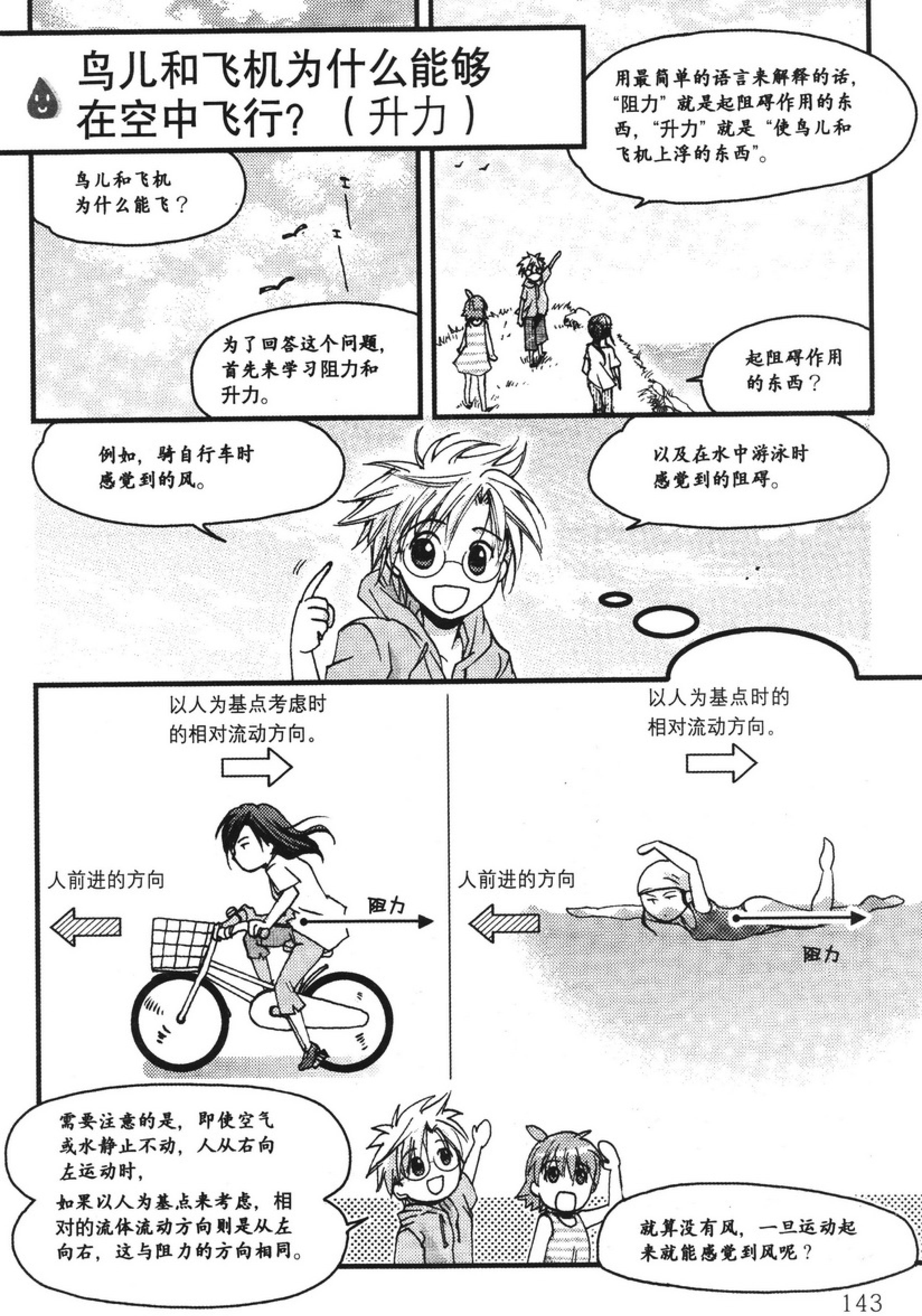




哇啊啊
哇，大海呀!
夏天的大海就是让人神清气爽啊！！
噗……
今天，我打算在这里上流体力学的最后一课！
对不起啊，部长，在百忙中打扰你了。
耶♪
没有啦……不要介意。
心情开始变好。
你帮了我大忙呢！
白石！白石！今天我们学习什么内容啊？
好高兴
好高兴


今天啊，我们要用流体力学的知识来解开超自然现象的谜团。
超自然现象！就是神秘现象！？
幽、幽灵之类的东西可是不存在的啊？
帆船为什么能够迎风前进？
投球手投出的曲线球为什么会拐弯？
高尔夫球表面为什么坑坑洼洼的？
接下来我们就要解开这些谜团。也就是
“流体作用于物体的力”！
而且还能回答鸟儿和飞机为什么能飞的问题。
哦！
这太好了。

鸟儿和飞机为什么能够在空中飞行？（升力）




刚刚说明了"阻力"的作用方向与流动方向相同，与此相对，
以人为基点时的相对流动方向。
升力
人前进的方向
阻力
所谓升力，指的是作用方向与流动方向成直角上（这种情况下的作用方向是垂直向上）的力。
升力的大小很大程度上依存于物体的形状。
机翼的形状就能够得到很大的升力……
遗憾的是，作用于自行车或者水中人的升力却非常小。
所以没有人能够骑着自行车飞到天上去啊……
要是有就好了……
啊！
升力是向上的力……这么说来，
(请参考本书第43页)
在讲解浮力的时候也提到过吧？
那我在这里就把"升力"和"浮力"的不同之处给大家讲清楚。
简单地说，所谓浮力，就是即使物体处于静止状态也会起作用的力。
与此相对，所谓升力，是物体和流体存在速度差时产生的力。
噢～…
浮
升
啊！原来如此！


说的确实没错，船静止的时候也能漂浮在海面上！
浮力
重力
是的！
鸟儿和飞机能飞是因为升力的作用。
以鸟儿为基点时，相对的流动方向。
升力
鸟儿前进的方向
阻力
以飞机为基点时的相对流动方向。
升力
飞机前进的方向
阻力
因为鸟儿和飞机之类物体的速度大于周围流体（空气）的速度，所以产生了升力。
哈哈……
问题这么快就解决了啊！升力很简单嘛！
绘布……你再认真考虑考虑。
理解升力产生的详细原因才是流体力学要讲的啊。
说的没错，部长！
那么，接下来我们就开始学习升力吧！
升力
太好了！正合我意！

帆船为什么能够迎风前进？（利用升力）



为了能够进一步理解升力，我们来考虑一下“**帆船为什么能够迎风前进**”这个谜团的答案。

刚好那艘帆船正在迎风曲折前进呢。

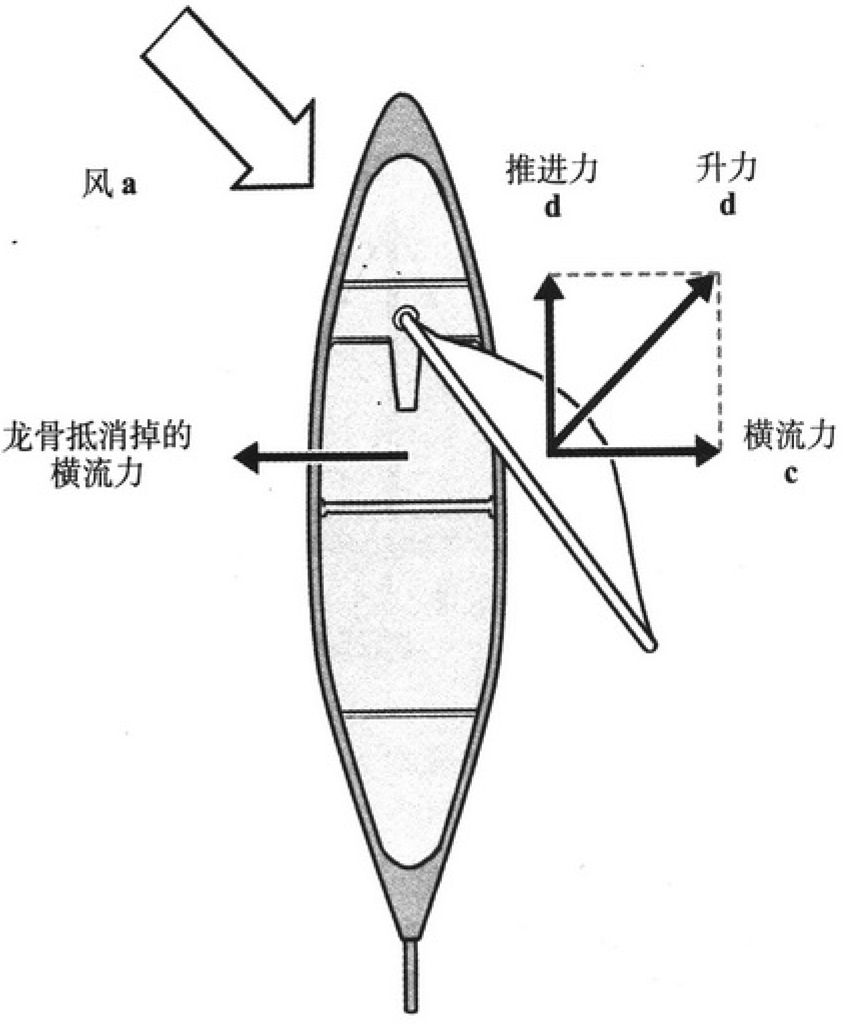
利用了风，帆船才能迎风前进……
确实是很奇怪呢！

真是不可思议呢！
直接说出结论吧，实际上帆船利用的是**升力**。

哎，是这样吗？
利用升力的不是只有飞机和鸟儿啊。

帆船的风帆**弯曲度**很大，是吧。
就像飞机的机翼一样，具有曲率※。
因此，帆上能够产生升力。

※ 曲率，是表示弯曲程度的量。弯曲程度越大，曲率越大。



正上方俯视的快艇图片

引自 aquamuse 141 帆船的原理—推进力。
http://www.aquamuse.jp/zukai/genri/suishin/index.html 部分修正。



请看上图。风从 **a** 方向吹过来，产生了与 **a** 成直角的升力 **b**。



啊，果然如此！从正上方观察帆船的话，两者呈直角这个情况就一目了然了。



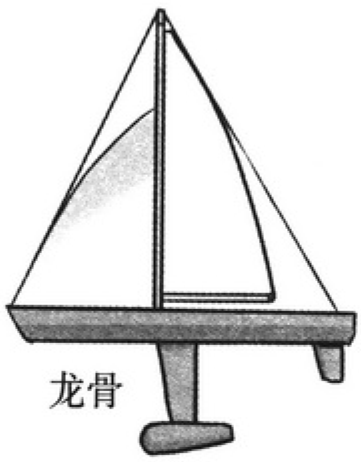
这个升力 **b** 可以分解成以下两个力来理解：一个是推动帆船前进的推进力 **d**，一个是横流力 **c**.



推进力很重要，可这个横流力就不需要了。

它会让快艇横向漂移……

为了抵消横流力，快艇上装有一块叫做龙骨的板。
龙骨安装在船体中央的下方，突进水中。



这个龙骨会尽可能抵消掉横流力 **c**。

帆船因推进力 **d** 的作用而前进。
如此看来，帆船的确是在迎风曲折前进呢！
这样就解开了帆船**为什么能够迎风前进**的谜团了啊。哇噢！

充分利用升力不断前进，我明白了……
可是，产生升力的谜团却是越来越大了啊。
因帆的曲率而产生升力……这是为什么呢？

喔！阿茜师姐，你的问题好深奥啊。

是你理解的太肤浅啦。

好啦好啦。
接下来我们再更加详细地学习产生升力的原因吧。

机翼和风帆有什么共同点呢？
（流线曲率定理）





首先我们来关注流线的一部分。请看▭部分。
弯曲的流线
r轴方向
压强 p_2
Δr
流速 U※
压强 p_1
※速度是流线的切线方向。（请参考本书第58页）
流线半径 r
流体密度 ρ
机翼的横断面
以直角外侧方向为r轴的正方向，微小距离用Δr来表示。
那么Δr的压强变化量为 $\Delta p=(p_2-p_1)$，
如果流体密度为ρ……
那么流线曲率定理可以用以下公式表示！
$\frac{\Delta p}{\Delta r}$为压强梯度，表示是半径方向压强的变化量。
意思是说，前进Δr（m），压强的变化量只有Δp(Pa)。
流速 U
流线半径 r
$$\frac{\Delta p}{\Delta r}=\rho\frac{U^2}{r}$$
在此需要注意一点，压强是高还是低，都是以大气压为标准来考虑的。
大气压
机翼下方的情况也是如此
也就是说，流线曲率定理可以概括如下。
机翼在弯曲的板上产生了弯曲的流动。
流线曲率定理
当机翼遇上风……
●机翼上方越靠近弯曲流线内侧的地方，其压强比大气压低。
●机翼下方越靠近弯曲流线外侧的地方，其压强比大气压高。
●只有机翼“最上方”和“最下方”处的压强与大气压相同。
大气压
弯曲的流线
压强降低
机翼
压强升高
大气压
上方压强 < 大气压
大气压 < 下方压强
所以……
上方压强 < 下方压强


除了机翼之外，关于弯曲板的具体例子还有……
我们再来考虑一下刚才提到的帆船。（请参考本书第147页）
流动
大气压
弯曲的流线
低
越靠近弯曲流线内侧的地方，压强越低。
高
从正上方俯视的帆船示意图
大气压
越靠近弯曲流线外侧的地方，压强越高。
当风帆遇上风……
•风帆上方靠近弯曲流线内侧的地方，压强比大气压低。
•风帆下方靠近弯曲流线外侧的地方，压强比大气压高。
•只有风帆的“最上方”和“最下方”处压强与大气压相同。
好了，阿茜部长，我们来整理一下这些内容。
嗯……
上方压强＜大气压，
大气压＜下方压强
……
所以上方压强＜下方压强。
噢
太棒了！
接下来请大家回忆一下我们野营时曾做过的实验，就是两个易拉罐被吸到一起的那个。

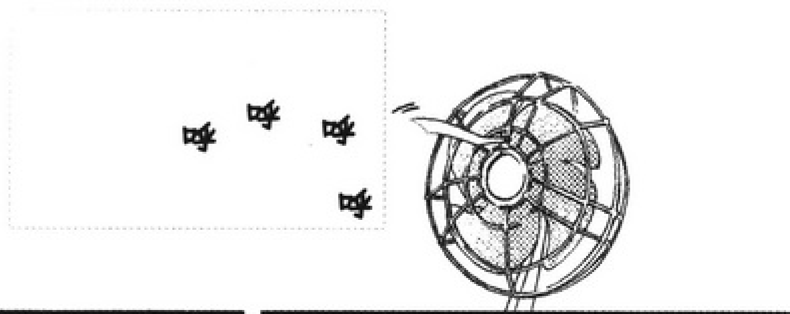

啊！
（请参考本书第79页）
那个易拉罐的实验！
的确没错，压强高的地方会有力作用于压强低的地方，两个易拉罐会被吸引到一起！
大气压
大气压
压强低的地方
说的很正确。
啊……
这是不是说，因为上方压强比下方压强低，这种压强差才产生了升力？
流动
低
从正上方看到的风帆示意图
升力
高
理解正确！
无论是飞机的机翼还是帆船的风帆，弯曲的流线产生了压强差，从而产生升力。
从正侧面观察到的飞机机翼横断面。
低
流动
升力
高
原来如此……这是特意将它们做成这种形状的啊……
让人感慨万千吧，绘布……
……绘布？
学姐……白石……
刨冰！咖喱！还有炒面！看起来味道真不错！
有啤酒
……那个家伙也被吸引过去了呢。
却不是被压强差……


匙子的奇怪现象
（升力实验）
在这样的地方吃咖喱饭，真是太美味了！
本来就美味的咖喱饭变得更好吃了呢！大海可真好！
可是，有点遗憾！我这份咖喱饭里面只有一块肉啊……
咦？
绘布，既然机会难得，
我们用匙子来做个实验吧。
将那个塑料匙子用线拴起来，
底部向右，垂直拉着。
然后用这个风扇……
来吧！
从上往下吹风。
这样一来……
风的流动
呼呼



!!
动了！
移动
太不可思议了……
向右侧运动了呢！
太棒了！
匙子奇怪现象啊！
笨蛋！
这是因为匙子左右产生了流线曲率引起的压强差，所以产生了从匙子的左侧向右侧的“升力”。
是这样吧，白石？
流动方向
高
低
升力
弯曲的流线
说的没错。真不愧是部长。
帆船的风帆和飞机的机翼其实跟这个情况相同。
这样来看匙子的形状很像机翼和风帆啊？
这里
嗯……这种弯曲产生了升力。
嗯 嗯……
可是……
能把匙子还给人家吗？
哼

游泳游累了（阻力）





如果有间休息室就好了……能好好休息休息……
好悠闲
是啊……
游泳很累人啊……
又刚吃完饭，稍微休息一会儿吧……
啊哈哈
我还记得呢，白石。
在海里游泳累人是因为有一个反作用的力，就是作用方向跟游泳方向相反的“阻力”。
说的没错！
顺便说明一下，在流体力学中，“阻力”和“升力”等因流动而产生的力总称为“流体力”。
流体力
升力
阻力
哎……
关系不是很亲密呢……
重力
摩擦力

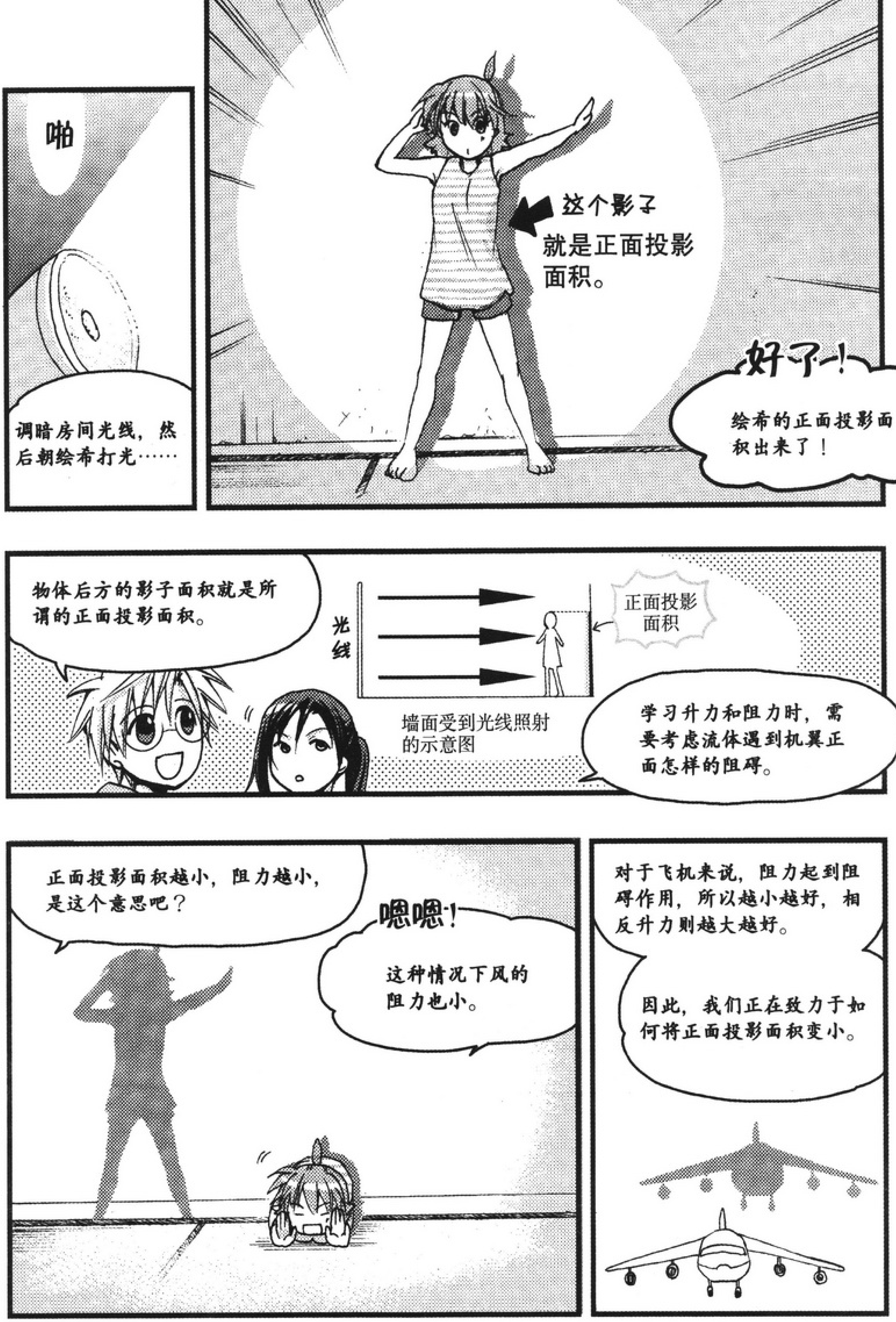

作用于物体的流体力跟动压——也就是流体的动能$\frac{1}{2}\rho U^2$成正比。
动压越大，流体力也就越大……
哎哎
白石，流体力包括升力和阻力，流速变快的话，这两种力都会变大吗？
是这样吗？
哎呀哎呀
升力变大我喜欢，阻力同时也变大吗？
升力
阻力
只有升力变大最好。
这不是很让人心烦吗？升力能帮助飞机飞行……可阻力却让我越游越累！！
绘希，你发现了一个很不错的问题呢！
说的没错，由于受到阻力的影响，升力无法充分发挥作用。
为了能够摆脱这种困境，需要苦下功夫，进行大量研究啊。

令人烦恼的困境（阻力系数与升力系数）





正好，让我们以飞机为例来进行学习。
阻力系数用C_D表示，升力系数用C_L表示，流体密度用ρ表示，流速用U表示。
机翼的面积用A表示……
嗯嗯
阻力 $D=C_D\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)A\,(\mathrm{N})$
升力 $L=C_L\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)A\,(\mathrm{N})$
系数
动压
机翼面积
这就是求阻力和升力的计算公式。
哇啊啊！
不管是流速加快，机翼面积增大，还是流体密度变大，都会起到流体力倍增的效果。
是的，这些要素的确会让流体力变大……
可是……
那个机翼面积指的是机翼哪个部分的面积啊？
对不起啊，我忘记这个问题了。
这个面积就是“正面投影面积”。
所谓正面投影面积，就是从正前方看到的物体的面积。
绘希，你站到墙的前面。
嗯
？？？



啪
调暗房间光线，然后朝绘希打光……
这个影子
就是正面投影面积。
好了—！
绘希的正面投影面积出来了！
物体后方的影子面积就是所谓的正面投影面积。
光线
正面投影面积
墙面受到光线照射的示意图
学习升力和阻力时，需要考虑流体遇到机翼正面怎样的阻碍。
正面投影面积越小，阻力越小，是这个意思吧？
嗯嗯！
这种情况下风的阻力也小。
对于飞机来说，阻力起到阻碍作用，所以越小越好，相反升力则越大越好。
因此，我们正在致力于如何将正面投影面积变小。

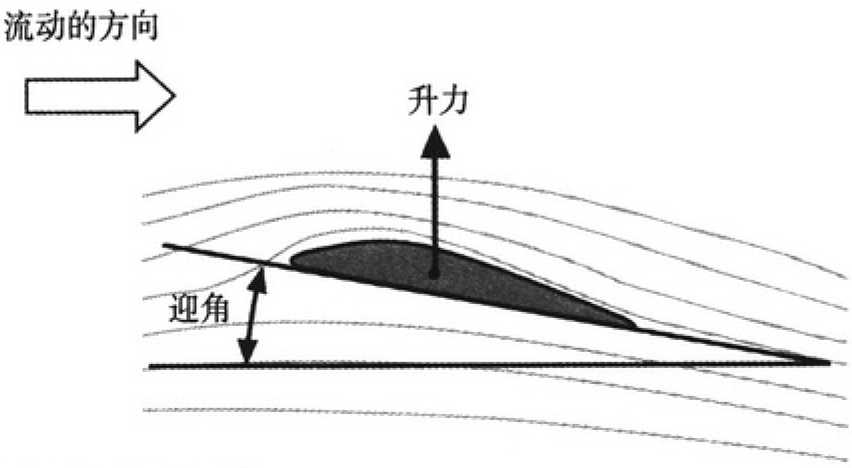

请看这架飞机。
推进力和阻力……
升力和机体重力……
升力
推进力
阻力
重力
全部处于平衡状态，所以飞机能够在天空中飞行。
虽然处在阻力和升力的矛盾下，但飞机还是成功保持了平衡状态，展翅翱翔在天空。
这样考虑，才能真正感受到飞机是克服了多少困难才能够在天空中飞翔的……
你能理解我了……幸子，我们两个人能够在一起工作真是太好了！
工作和你都能兼顾，不需要再考虑选择哪一个了！
幸男……

失速了（迎角、分离）



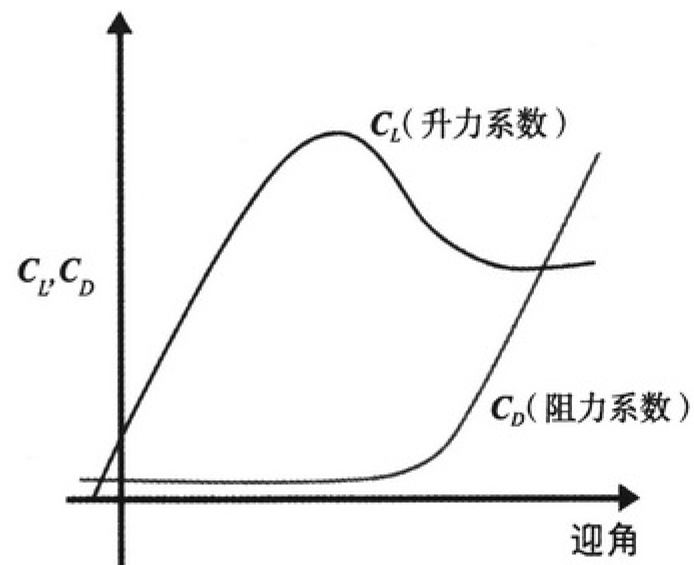
接下来我们继续介绍一些关于阻力系数和升力系数的知识。

所谓机翼的倾斜度，如下图所示，指的是表示“相对于流体的机翼的倾斜度”，也叫**迎角**。



然后请看下面的图表。

这个图表表示迎角和阻力系数、升力系数的关系。



迎角、阻力系数、升力系数的关系图表



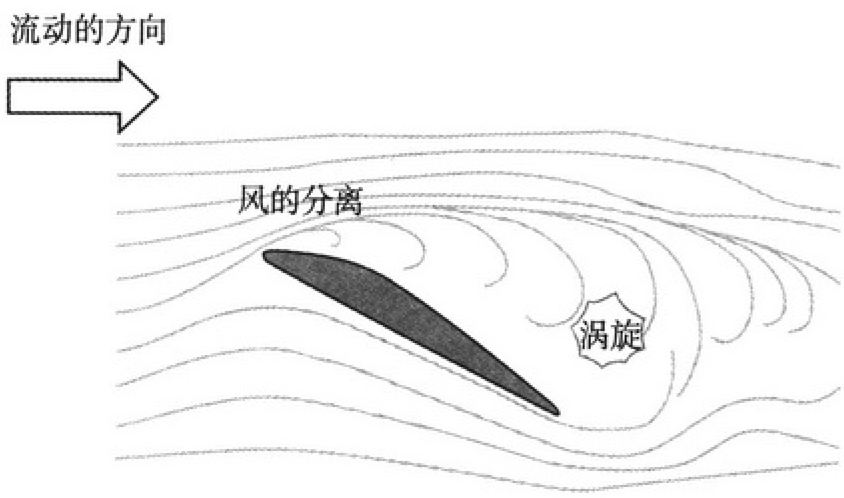
嗯……机翼的倾斜度越大，即迎角越大，升力系数就越大，但当大到一定程度时，升力系数反而变小了……

在某个时刻，升力突然变小，阻力却突然变大，情况出现逆转……
真恐怖～这到底是怎么回事啊？

那么我来解释一下此时发生了什么事情。
迎角在一定范围内增大，升力也会变大。
风能够顺利流入机翼周围。

嗯嗯。风和机翼关系好，很幸福呢。

但是！当迎角超过一定角度，风就不能够顺利流入机翼周围。
在机翼上发生风的**分离**现象，就是**气流分离现象**。
然后机翼后方产生涡旋。



哎！产生了涡旋，看来升力要遇到麻烦了……

原来如此。这种状态就是图表中的——升力下降、阻力增加、飞机失速的部分啊。
飞机在天空中飞行，真是很辛苦啊。

2. 作用于旋转物体的力

弧线球为什么会弯曲？（马格努斯效应）




伯努利定理（流体的能量守恒定律）
$\frac{1}{2}\rho u^2 + p + \rho g z =$ 恒定
动能
压强能
势能
如果势能恒定……
流线上流速变快，那么压强就降低，
流线上流速变慢，那么压强就升高。
是的是的！我想起来了！想起来了！
那么，请想象一下。
我们正在打棒球……
哦……
哦……
加油！加油！
好
投球手 阿茜
击球手 绘布
接球手 白石
来吧


投球手是阿茜部长。
在
击球手是绘希。
我是接球手。
哎！哎！第4轮开始！
……那么我就以接球手的视角来解释说明。
部长，请发弧线球！
好的。
这↑……
嗨！
哇啊！
好球！



刚才的球，看到了吗？
那这次要好好看着！
太远了……
嗯？
啊！！
好球！
哇
白、白石，我看到了！
虽然没打到，但看到了哎！
唉……
好累……
我明白了！
向右拐啦！
而且是两次！
棒球
是的。那就是弧线球。
那我们就用实际看到的现象来检验流体力学吧。
刚才部长的投球我已经用高空照相机拍下来了，供我们学习用！
什么时候还安装了照相机啊……

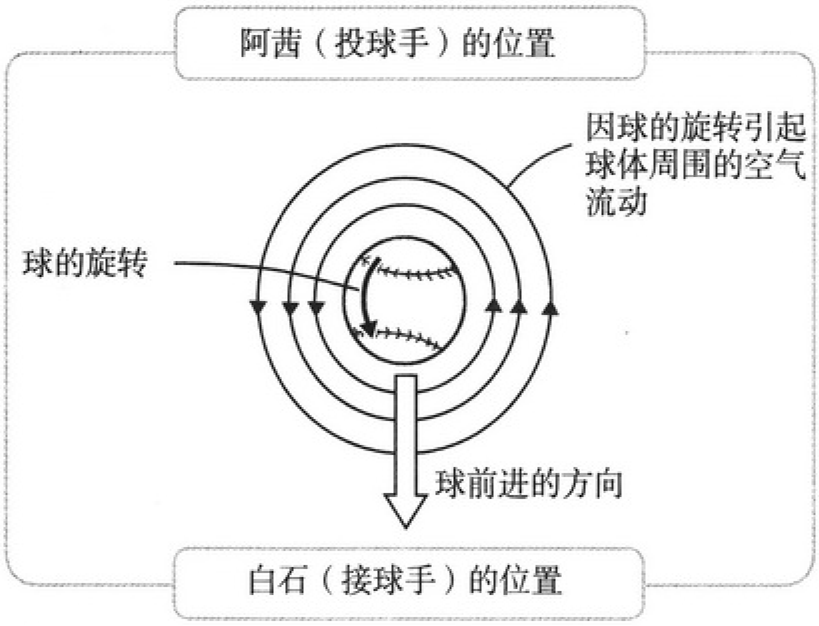
投球摘要



~那个时候，棒球拐弯了~



来看从上空拍摄的图片，首先我们确认一下图片中部长的位置（投球手）和我（接球手）的位置。球从部长的方向被投掷过来。

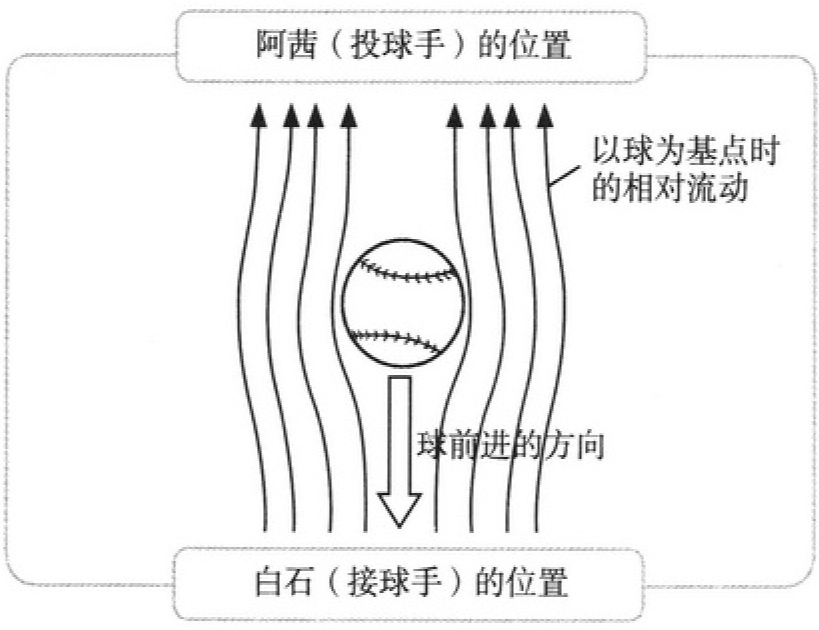




嗯嗯。因为是弧线球，所以前进中保持逆时针旋转。

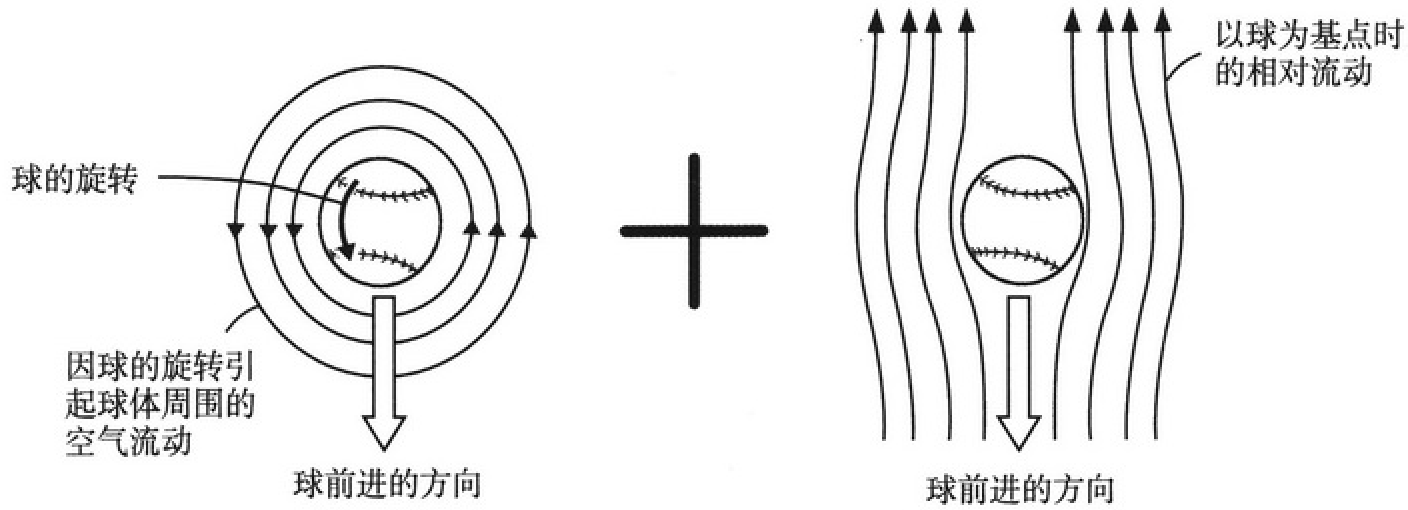


受到棒球旋转的影响，棒球周围的空气流动也呈逆时针方向。与此同时，从球的角度来看，在球的前进方向上有一种相对流动迎面扑来。具体情况如下图所示。



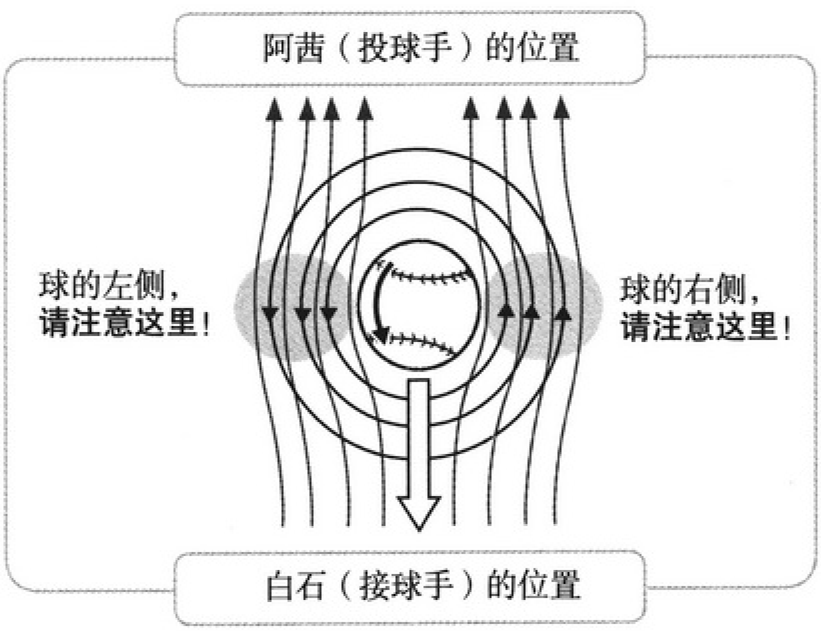
是这样啊！就像自行车的例子（请参考本书第 143 页）中所讲的那样，以球为基点来考虑的话，风从击球手方向吹向投球手方向，这其中的道理是一样的。

那么，现在我们将刚才解释过的这两个流动组合起来看一下。
到底会是什么情况呢？



……心怦怦跳呢。

好了！将两个流动组合起来的示意图如下。
怎么样？有没有发现什么？



啊……左右两侧箭头的方向不一样啊！

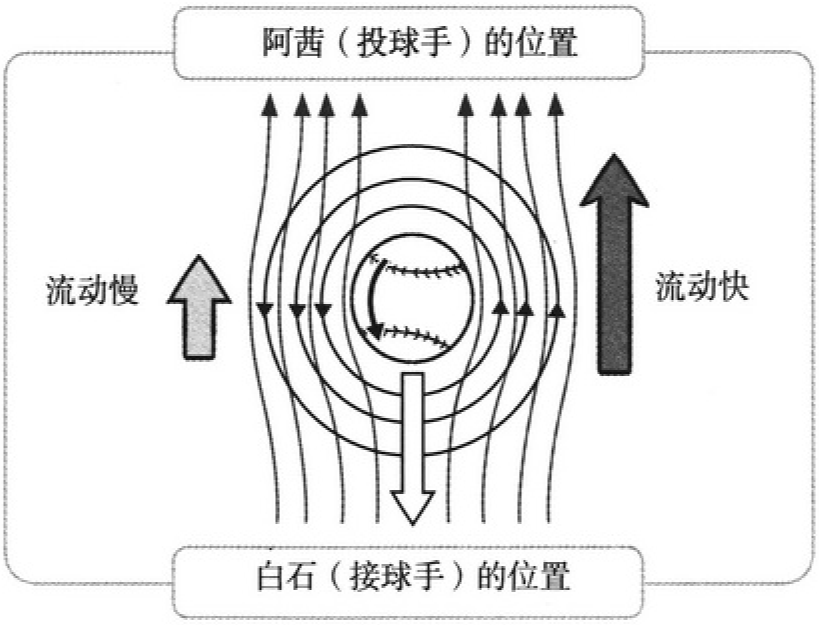
嗯。具体内容可以总结如下。

要 点

球的右侧……
以球为基点考虑时，与球前进方向相对的流动和
因球的旋转引起的球体周围的空气流动
其方向相同。

球的左侧……
以球为基点考虑时，与球前进方向相对的流动和
因球的旋转引起的球体周围的空气流动
方向相反。

说的没错！所以……
球的右侧**流速快，**球的左侧**流速慢**。



嗯嗯。



我们再来复习一下伯努利定理。

要 点

伯努利定理

如果势能恒定……

流线上流速变快那么压强就**降低**，

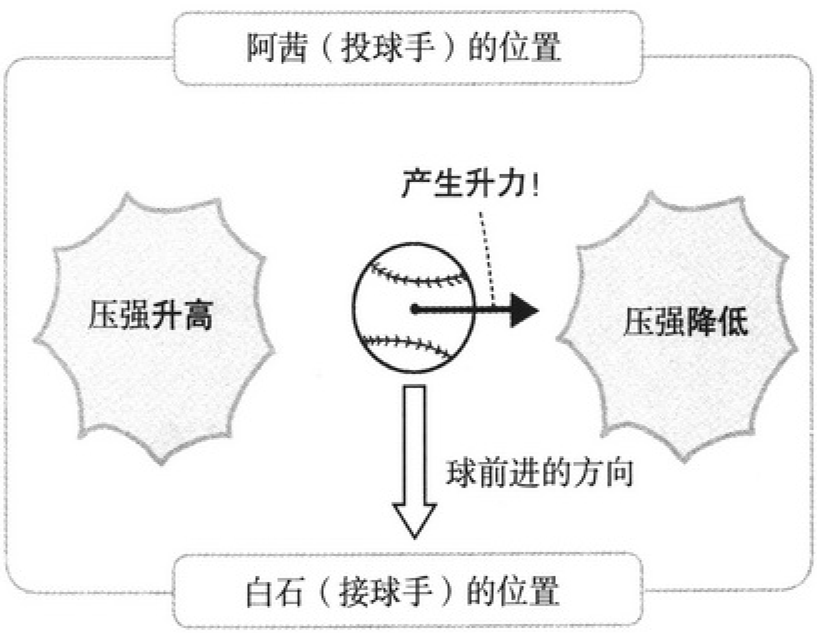
流线上流速变慢那么压强就**升高**。

也就是说，球的右侧压强降低，球的左侧压强升高了。



这里也有**压强差**……

这么说的话，这是**升力**啊！





回答正确！这里产生了升力。

力从压强高的左侧作用于压强低的右侧，球受到这个力的挤压才会发生拐弯现象。



原来如此……所以，从接球手的角度来看，球向右侧拐弯了。
握法也变了。
顺便说明一下，喷射球情况则完全相反。
但是，弧线球中有升力起作用……
啊哈哈
流体力学跟体育运动有关系……
就像这样，被放进同样流动中的球因旋转而得到升力的现象就是"马格努斯效应"。
马格努斯效应
同样的流动
旋转
流动慢（压强高）
流动快（压强低）
升力
我觉得马格努斯效应很厉害啊！
投球手可以利用这个效应投出变化球，将击球手打倒！
既然我们已经弄明白了球拐弯的原因，那就继续打球吧！
这次让阿茜学姐做击球手！
哼
我才不呢……

3. 流动分离

为什么不是滑溜溜，而是坑坑洼洼？（空气阻力的减小）



立刻就到最后一个问题了！
现在来解释说明**“高尔夫球表面为什么是坑坑洼洼的？”**这个问题。

好的！光脚踩踏高尔夫球的话，就像穴位按摩一样，感觉很舒服。我认为是因为这个原因才把它做成坑坑洼洼的。

……白石，给点提示吧。

好的。高尔夫球这个坑坑洼洼的表面还有一段有趣的故事呢。
以前的高尔夫球只是橡胶或树脂做成的球体，表面滑溜溜的。
可是有一天人们发现，**跟全新的球相比，那些用旧磨损了的、坑坑洼洼的球反而能飞得更远**。所以，从那时开始便把球的表面做的坑坑洼洼。
这些坑坑洼洼的部分被称为“**凹痕**”。

哎？还有这样的诞生秘事呢。

能够飞得更远，是因为升力增加、阻力减小的缘故吧。

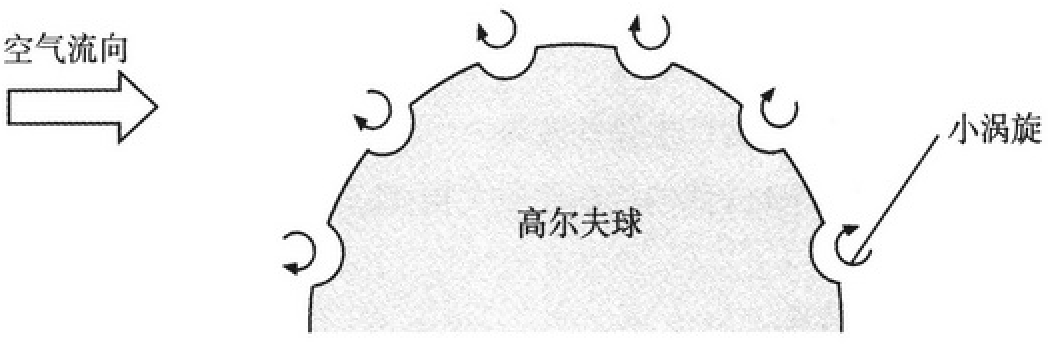
说的没错！
接下来我们详细说明一下**空气阻力减小**的情况。

……嗯？

可是，认真考虑一下的话，感觉有点奇怪啊……
一般不都是表面滑溜溜的球受到的空气阻力更小吗？

是啊。我也是这么想的。

这么想很正常。不过这里的情况有点复杂。
由于这些凹痕，球的表面产生了很多“**小涡旋**”。



高尔夫球表面产生的小涡旋

小涡旋？怎么会！如果有涡旋的话，球表面的空气流动岂不是变得乱七八糟？

是的。因为有这些小涡旋，球表面的流动就变成“**湍流**”。关于湍流的概念之前我们讲过了，就是流体的不规则流动。（请参考本书第 114 页）

我不明白……为什么要特意使其变成湍流呢……

呵呵呵。这其中有着很深很深的原因。
为了解开高尔夫球的谜团，需动用所有学到的流体力学知识，相信我们一定能够解开这个谜团！
解释起来有点复杂，那我们就认真开始吧。

微小世界里面的恐怖事件（分离）



假定流体中放置了一个物体。
那么，这个物体周围流动会减慢。这个特殊领域被称为“**边界层**”。

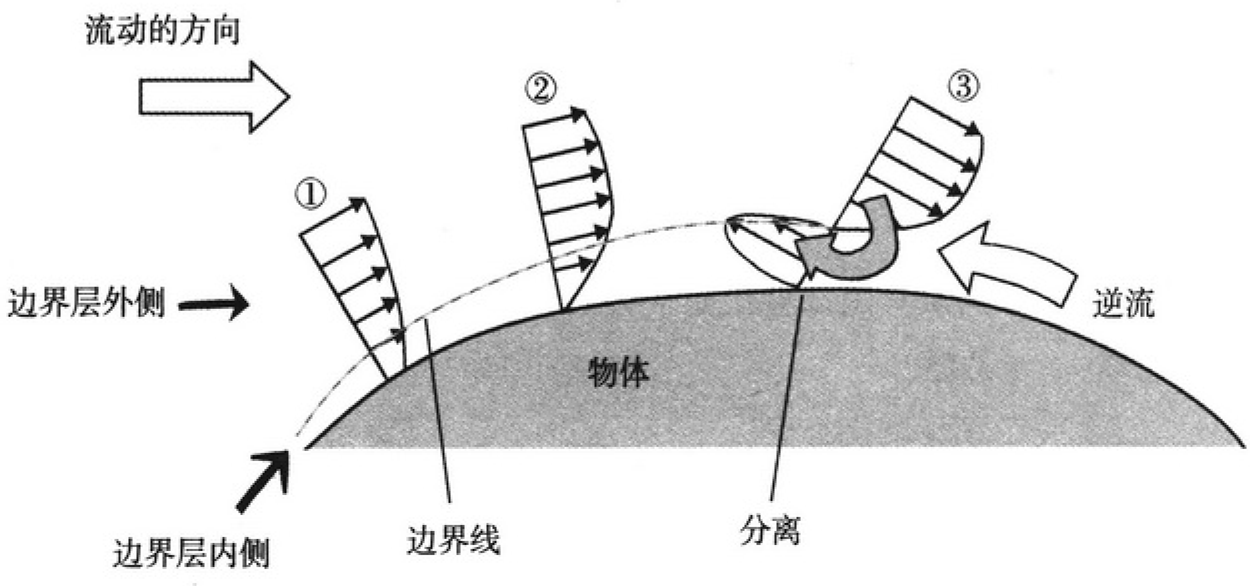
顺便说明一下，边界层非常薄，例如高尔夫球的边界层厚度不到 1mm。



唉……是个相当微小的世界呢！



边界层的流动会产生黏性效果。
边界层内侧和外侧的流动性质大相径庭。



边界层周围的流速分布情况



是真的啊。看①和②处，边界层的外侧流速变化小，内侧流速变化激烈。



③处刚好处于边界层上，变成了逆流……

边界层内侧由于速度梯度大，流体的动能因黏性力的作用而损失。

啊，我想起来了。
速度梯度大的话，“妨碍流动”的**黏性力**也增大（请参考本书第 99 页）。



说的没错！因为这个缘故，边界层内侧的流速会越来越慢。
流速变慢……也就是说，边界层内侧的**压强增大**。

沿着流线方向流速变慢的话，压强就变大！
这是伯努利定理的内容啊。

另一方面，边界层外侧的流动因为黏性接近理想流体，所以动能损失很小，流速保持不变。

哇……有一种让人讨厌的预感……

所以，越靠近边界层下流，在物体周围流动越困难，最后与物体表面分离，在下流处形成“**巨大的分离涡旋**”，这就是流动的**分离**状态。
上页图中③处的状态就是流体的分离状态。

啊！哎哎，我怎么好像对“分离”这个词儿有印象呢。
以前讲飞机机翼倾斜时出现过（请参考本书第 162 页）。

顺便说一句，分离写作“分离”。是分开的那个分字。

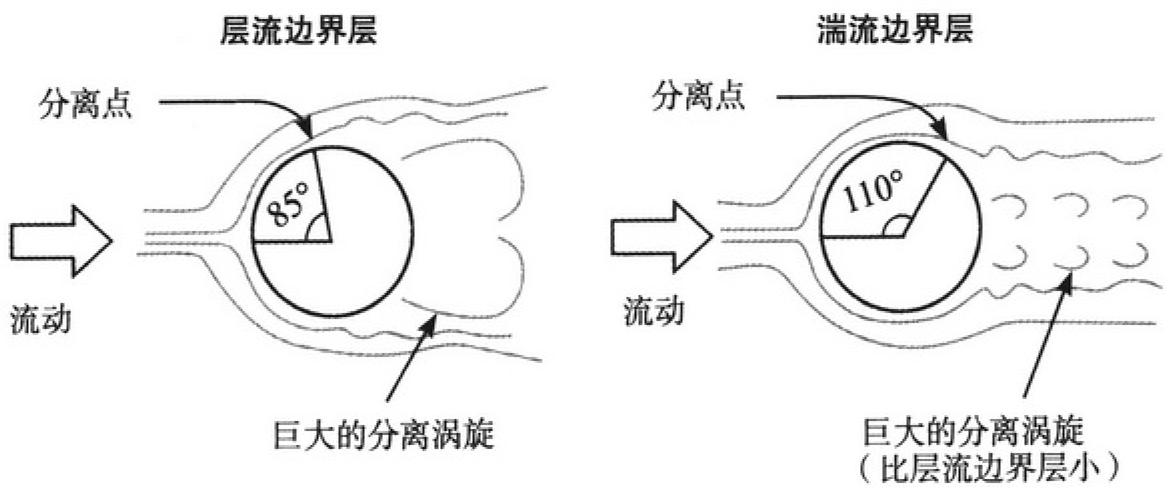
是流体分离开的意思啊。分离之后会怎样呢?

哈哈哈。可不得了呢……
分离现象发生后，阻力就会急剧变大。
飞机机翼上如果发生空气分离现象，升力变小，阻力变大，飞机就会突然失速……

太恐怖了……分离，真让人讨厌……
虽然是眼睛看不见的微小世界，却也在发生恐怖事件呢……

嗯。反过来说，为了增加升力，减小阻力，就要想办法不让分离现象出现。

正中关键！我们已经在慢慢接近真相了。
那么接下来我们看下图。
边界层分离的位置，就是“**分离点**”，边界层会因**层流和湍流不同**而不同。



边界层的分离。

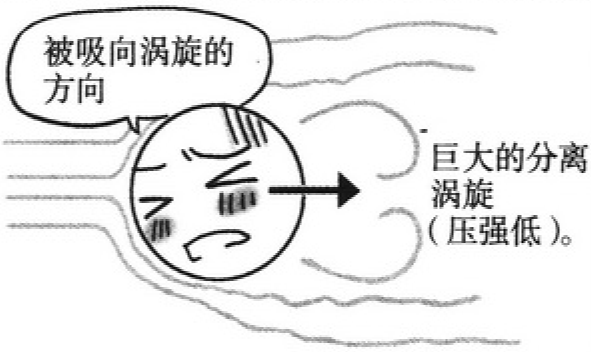
嗯嗯，的确如此！
与层流相比，湍流的分离点靠后，也就是更靠近下流。

是的。
层流和湍流相比，边界层到分离点的角度更大。
看图就能知道，层流约为 85°、乱流为 110°。

那么接下来我们关注分离后下流产生的“巨大的分离涡旋”。
产生“巨大的分离涡旋”后，**压强变低**，变为**阻力**。

要　点

流动从物体表面分离
↓
分离的下流处
产生“巨大的分离涡旋”，
压强变低，变为**阻力**。



我们再来看一遍刚才的图。层流和湍流相比，哪个下流的“巨大的分离涡旋”更小呢？

啊！**湍流**产生的“巨大的分离涡旋”要比层流产生的“巨大的分离涡旋”**小**。

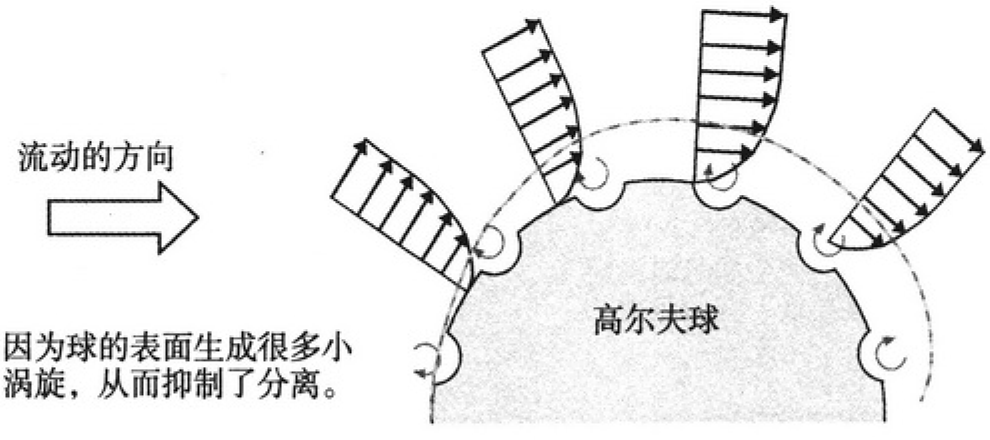
是的，边界层变为**湍流**后，分离点朝下流移动，与层流相比，物体后方的“巨大的分离涡旋”**较小**。

“巨大的分离涡旋”小的话，那么阻力就小。
也就是说，还是湍流比较好。

……那个？
高尔夫球的凹痕能够产生湍流的效果……

是的！
正好，请想象一下高尔夫球。
高尔夫球表面有很多凹痕，是为了让球表面附近的流动变成“湍流”。

球表面的流动一旦变成“湍流”，分离的位置就会移向球的后方。



凹痕防止分离

啊，我明白了！
也就是说，凹痕能够帮助空气流入球后方，从而尽可能抑制分离现象。
如果分离发生的话，可不得了呢。

原来如此。
的确多亏这些凹痕，空气的阻力变小了呢。



将以上话题总结归纳……
也就是说，“通过凹痕特意制造了很多涡旋，从而使得边界层的流动变成湍流，从而**抑制分离**”。



通过在球的周围制造“小涡旋”，能够让球后方“巨大的分离涡旋”变小，空气阻力也减小……
虽然有点儿复杂，但弄明白了之后也挺有意思的。



嗯嗯！刚开始我不明白为什么要通过制造“小涡旋”来制造湍流，现在明白了。
高尔夫球的坑坑洼洼中还隐藏着这样的秘密呀……



为了解开这个谜团，我们复习了很多流体力学的知识，例如升力、阻力、层流、湍流、伯努利定理、黏性，等等。



嗯。最后解开了谜团。



傍晚的大海……
安静
让人觉得有点心情烦闷呢……
还是有点孤单寂寞呢……
总之触碰到内心的某根弦了……
嗯
是啊……
3个人一起参加的研究部活动，
这也是最后一次了……
你们这两个家伙，什么时候变得这么多愁善感了啊！
回家啦！
啊……
好！！


咔嚓
咔嚓
咔嚓
咔嚓
学姐，累了吧。
学习真的很辛苦啊……
咔嚓
咔嚓
本来为了散心才把阿茜师姐也邀请来了……
结果却这么扫兴……
这会不会成为最后的回忆啊……
……
来也
……哎，绘布，怎么了……
哼
哼
哼
这是怎么了……
好像突然想起什么似的……


7个月后——
部长，
阿茜部长！
毕业证书授
恭喜你毕业啦！
恭喜你顺利进入大学！
实力雄厚啊！
对吧
绘希，有什么事吗？
沙
沙
沙
啊，
是绘希啊！

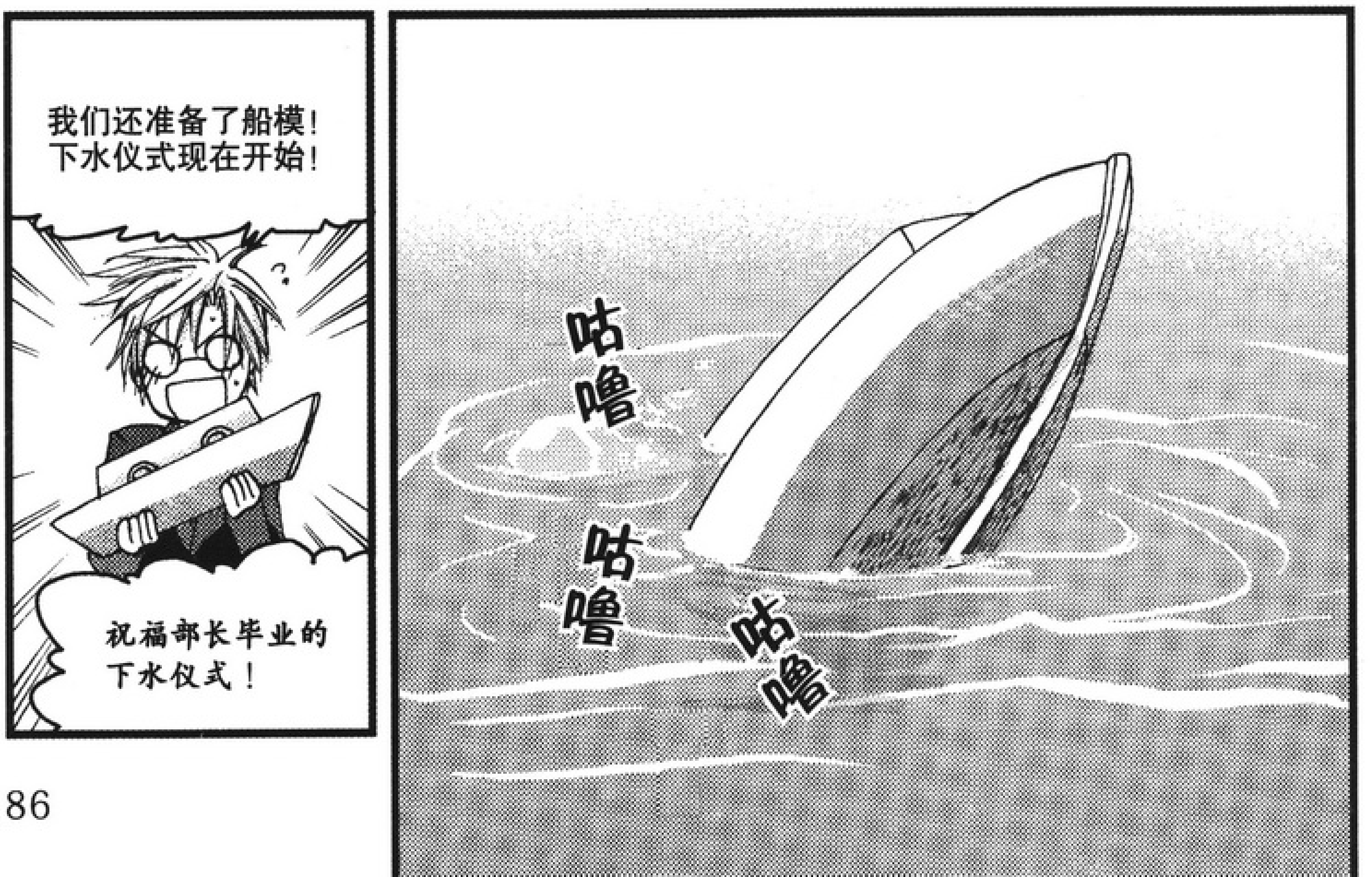


我们在研究部活动室等你！
一定要来噢！
……这里也已经有一个学期没来了呢。
研究部
我也正打算来这里道别一下。
绘希的那些神秘商品一定又增加了不少吧……
这个
啊……到处都是些不值钱的东西……
哎？是个好主意啊！
我还打算带到毕业典礼上呢！
咯噔噔
咯噔噔
的确是个好主意！我们开始吧！


看起来更像物理研究部了呢，
能够在这里开欢送会，真的很高兴啊。
全部都是绘布的功劳啊，幸亏你对流体力学这么感兴趣。
真是太好了。
是多亏了白石才对啊。
我虽然是你的学姐，却处处都是你在教我。
没啥……
为什么船不会沉没、为什么飞机能够飞翔，我把这些问题当做理所当然的事情，从来没考虑过为什么。
还有很多身边的其他问题，我都不知道隐藏在它们背后的原因。
浮力、升力……真的就像魔法一样啊。
学了之后，我就开始想着怎么好好利用了！
如果能够更早点儿知道就好了，每次学习的时候，我都这么想。


所以，经过认真考虑，
我打算利用流体力学的知识来变魔术欢送阿茜学姐！
可是……
绘布这家伙，到底想干什么。
学姐！！
看这里，这里！
请大家看这里！！！
那家伙在干什么啊……
哎，那是什么啊？
是我和绘希制作的飞机模型。
学姐的毕业纪念会和欢送会，现在开始！
带着大家学习流体力学的美好回忆，
展翅飞向美好未来吧！


咚
咚
!!!?
啊
啊
哎呀哎呀哎呀，不光是这些啊！哎！绘布！
部长，请跟我到外面来一下。


我们还准备了船模！下水仪式现在开始！
祝福部长毕业的下水仪式！
咕噜
咕噜
咕噜


咕噜
真、真对不起啊……
好像是我把流体力学的数据计算错了……
教大家的时候一副那么了不起的样子，现在却是这么一副狼狈相，好没面子……
啊哈哈
叭唧
这、这样的话，轮到神秘人物出场了！是这样啊！！
因为升力不足，妖精，不，是妖怪的……
当
如果升力是妖精，那么浮力又是什么呢？
浮力……浮力也是妖精？
嗨
从一开始到最后，你们俩还真热闹啊！
即将入学的学弟学妹们可有的受了啊！
哈
哈
哈



哈哈……
绘希的那个预知未来的梦，就是预示的这些吧。
以那件事为契机我们才开始学习流体力学。
这让我一下子想起来很多以前的事情啊。
唉……
我很高兴，绘希，白石。
谢谢你们了。
学姐……
可真包容我们！
这个
这个
部长，请回忆一下我们在海边学习的场景！
流体力学中的浮力、升力，
还有……
阻力！
！


啊……
哗啦
呵呵呵呵！
很成功啊！
这可是绘希的主意！



漫天飞舞的彩色纸片……难道也跟流体力学有关？
我是不是想到了个不错的主意啊……
从海边回来的时候，绘希问了我这个问题……
我调查了一下，彩色纸片的原理好像是同时利用了升力和阻力。
所以，我们就以此为契机，给学姐做了这个礼物……
嗯——
嗯——
嗯——
彩色纸片在下落过程中受到的空气阻力情况非常复杂。
所以，我读了一篇关于研究纸片、树叶等自由落体运动的论文，就是关于树叶模拟装置的论文！
我个人也进行了一项研究呢，把纸切碎，看哪种形状的纸片能够飞的最美。
四角形的比三角形的飞的更好看！学姐，你知道了吧！！
在流体力学中，空气阻力是起阻碍作用的力。
正因为如此，彩色纸片才能够漫天飞舞啊！
所以，怎么说呢……
希望学姐将来即使遇到困难的话，也能够扭转乾坤，就像彩色纸片一样发出华丽的光芒！
这么说虽然有点牵强附会……
但学姐一定能够理解我们的，对吧！



不说我也能理解啊。
你们的心意……
呜
……恭喜你毕业，
阿茜学姐！
那个……


刚才用快速成像相机拍照的时候，部长身后有什么东西吗？
！！！！！？
哇啊啊啊啊啊！！！
不得了啦不得了啦！
是幽灵！！！！
啊，是那个……
是绘希的神秘商品反射到窗户上的影像而已。
不、不会吧……
白石！你还真是个相当坏的家伙呢！
对了，白石，来，集合了！
哎！
我、是我吗？
话又说回来，绘希，都怪你没有收拾好。
啊！这样啊！
啊！学姐，对不起啦！

参考文献

書籍

●石綿良三 著

『図解雑学 流体力学』 ナツメ社（2007）

●久保田浪之介 著

『トコトンやさしい流体力学の本』 日刊工業新聞社（2007）

●小峯龍男 著

『よくわかる最新流体工学の基本』 秀和システム（2006）

●安達勝之・菅野一仁 共著

『絵ときでわかる流体工学』 オーム社（2005）

●飯田明由・小川隆申・武居昌宏 共著

『基礎から学ぶ流体力学』 オーム社（2007）

webサイト

●沖縄ダイビング

http://www.benthos.info/net_diving_school/program/skin/p09.htm

●流体を知ろう！

http://www.robo-dispenser.com/compass/compass01.html

●飛行の原理

http://www.ops.dti.ne.jp/~gotha/Aircraft/study1.html


关于飞机升力和船浮力的计算……
到底是哪里弄错了呢……
哼……
嗯……
一个零就够了……
果然是因为乱写乱画才导致失败的啊……

（O-4081.0102）
责任编辑：张丽娜　赵丽艳
责任制作：董立颖　魏　谨
封面制作：许思麒

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社　社长 总编
“希望杯”全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任
周国镇

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》 原副总编辑
中华炎黄文化研究会 常务副会长
鲁谆

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。

中国人民大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长
成同社

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士
张磊

上架建议：科普/漫画
ISBN 978-7-03-029015-1
9 787030 290151 >

科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
zhaoliyan@mail.sciencep.com

定价：32.00元